

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



Návrh sběrné jednotky pro bezdrátové  
senzorové uzly s možností prodloužení  
jejich dosahu

Design of a Unit for Collecting the Data  
from Sensor Nodes with the Possibility of  
Extending their Range

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Elektronika a komunikace  
Autor práce: Martin Novotný  
Vedoucí práce: Ing. Adam Bouřa, Ph.D

Praha 2022



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **457126**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh sběrné jednotky pro bezdrátové senzorové uzly s možností prodloužení jejich dosahu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of a Unit for Collecting the Data from Sensor Nodes with the Possibility of Extending their Range**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou komunikačních rozhraní, která se využívají pro účely bezdrátového sběru senzorových dat [1, 2] a jejich ukládání do centrální jednotky [3, 4].
2. Na základě získaných poznatků navrhnete zařízení pro automatizovaný sběr, přeposílání a ukládání senzorových dat z dostupných senzorových uzlů [5].
3. Sestavte testovací pracoviště a ověřte parametry a funkčnost vašeho řešení. Vše kriticky zhodnoťte a navrhnete případná vylepšení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Hac, A.: Wireless sensor network design, John Wiley & Sons, Ltd, 2003, ISBN 0-470-86736-1
- [2] Garlík, B.: Inteligentní budovy, BEN - technická literatura, Praha 2012, ISBN 978-80-7300-440-8
- [3] Matoušek, D.: Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR AT mega 16, 4. díl, Praha 2006, Nakladatelství BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-4-8.
- [4] Mann, B.: C pro mikrokontroléry, 1. Vydání, Praha 2003, Nakladatelství BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-077-6.
- [5] Bouřa, A.: A SIMPLE AND AFFORDABLE POWERING CIRCUIT FOR IoT SENSOR NODES WITH ENERGY HARVESTING, Metrology and Measurement Systems. 2020, 27(4), 575-587. ISSN 0860-8229.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Adam Bouřa, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Adam Bouřa, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....  
Martin Novotný

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu Ing. Adamu Bouřovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a za podnětné rady, které mi ji pomohly zhotovit

*Abstrakt:* Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací sběrné jednotky pro bezdrátové sensorové uzly s možností prodloužení dosahu přenosu dat. Jednotka byla navržena tak, aby pro bezdrátový přenos dat používala stejný radiokomunikační modul jako sensorový uzel, který používá pro komunikaci kmitočtové pásmo 433 MHz. Byly realizovány tři jednotky, které používají pro ukládání dat micro SD kartu. Na bezdrátově přenášená data je před vysláním aplikován Hammingův samoopravný kód (7,4). Přeposláním sensorových dat mezi jednotkami je navýšen dosah přenosu dat od sensorového uzlu. Součástí práce je testování rádiového spojení. Nejvyšší dosah rádiového signálu byl 89 metrů pro přímou viditelnost vysílače a přijímače, pokud se ale nachází mezi přijímačem a vysílačem překážka, dochází ke snížení přenášené energie a tím ke snížení dosahu signálu. Bylo ověřeno, že pro sběr sensorových dat uvnitř rodinného domu stačí použít pouze jednu jednotku.

*Klíčová slova:* Bezdrátová sensorová síť, komunikační rozhraní, ukládání sensorových dat, Hammingův samoopravný kód, mikrokontrolér, programování mikrokontroléru

*Abstract:* This bachelor thesis deals with the design and implementation of a unit for collecting data from wireless sensor nodes with the possibility of extending the data transmission range. The unit has been designed to use the same radio communication module as the sensor node. Sensors nodes use the 433 MHz frequency band for communication. Three units have been created that use a micro SD card for storing of data. Hamming error-correction code is applied on the wirelessly transmitted data before transmission. The data transmission range from the sensor node was increased by forwarding the data between the units. The thesis includes the measurement of the radio link. The maximum measured range was 89 meters between transmitter and receiver for direct visibility. The distance was decreased when an obstacle is placed between the receiver and transmitter because the transmitted energy of radio waves was reduced. It has been verified that only one unit can be used for collecting data inside the house.

*Key words:* Wireless sensor network, communication interface, storing sensor data, Hamming error-correction code, microcontroller, microcontroller programming





# Obsah

Úvod	11
<b>1 Teoretický úvod</b>	<b>13</b>
1.1 Komunikační rozhraní	13
1.1.1 Frekvenční pásmo 433 MHz	13
1.1.2 Bluetooth	14
1.1.3 Zigbee	15
1.1.4 Wi-Fi	15
1.1.5 LoRA	16
1.1.6 Rozhraní SPI	16
1.1.7 Rozhraní USART	17
1.1.8 Rozhraní I <sup>2</sup> C	17
1.2 Ukládání sensorových dat	18
1.2.1 CF karta	18
1.2.2 MMC karta	18
1.2.3 SD karta	18
1.3 Samoopravné kódy	19
1.3.1 Lineární kódy	20
1.3.2 Cyklický kód	21
1.3.3 Hammingův kód	21
<b>2 Návrh jednotky</b>	<b>23</b>
2.1 Sensorový uzel	23
2.2 Radiokomunikační modul	23
2.3 Řízení jednotky	24
2.4 Přepínání datového spojení rádiového modulu	25
2.5 Ukládání dat	26
2.6 Obvod reálného času	26
2.7 Displej	27
2.8 Napájecí obvody	27
2.8.1 Obvod MC78L05	27
2.8.2 Obvod LF33CDT	28
2.9 Rozdílné logické pracovní úrovně obvodů	28
<b>3 Realizace jednotky</b>	<b>29</b>
<b>4 Návrh firmwaru</b>	<b>31</b>
4.1 Časová synchronizace	31

4.2	Vysílací interval . . . . .	32
4.3	Popis činnosti jednotky . . . . .	32
4.4	Struktura hlavního programu . . . . .	34
4.5	Struktura podprogramu TIME1 COMPA . . . . .	34
4.6	Struktura podprogramu USART RX . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Testování jednotky</b>	<b>37</b>
5.1	Měření rádiového dosahu . . . . .	37
5.1.1	Měření při přímé viditelnosti zařízení . . . . .	38
5.1.2	Měření s překážkou . . . . .	39
5.1.3	Měření uvnitř rodinného domu . . . . .	40
	<b>Závěr</b>	<b>43</b>
	<b>Literatura</b>	<b>44</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>48</b>
<b>A</b>	<b>Příloha</b>	<b>49</b>
A.1	Realizované jednotky . . . . .	49
A.2	Senzorový uzel . . . . .	50
A.3	Radiokomunikační modul . . . . .	50
A.4	Schéma zapojení jednotky . . . . .	51
A.5	Deska plošných spojů-horní strana . . . . .	52
A.6	Deska plošných spojů-dolní strana . . . . .	52
A.7	Deska plošných spojů-rozmístění součástek . . . . .	53
A.8	Měřené prostředí s překážkou . . . . .	53
<b>B</b>	<b>Příloha CD</b>	<b>55</b>
B.1	Obsah příloženého CD . . . . .	55

# Úvod

Tato práce se zabývá návrhem a realizací jednotky, která umožňuje bezdrátové přijímání, ukládání a přeposílání dat ze sensorového uzlu [1].

Práce vychází z návrh jednotky, která umožňovala příjem dat ze sensorového uzlu a jejich zobrazení na LCD displeji.

Jednotka je v této práci vylepšena. Dovoluje pracovat v režimu rádiového přijímače i vysílače. Přijatá sensorová data ukládá a přidává informaci o času přijetí a napětí, které je úměrné výkonu přijatého signálu. Použitím více jednotek je možné navýšit dosah přenosu dat od sensorového uzlu. Na bezdrátově přenášená data je aplikován samoopravný kód.

První část této práce se zabývá problematikou komunikačního rozhraní, možností ukládání sensorových dat a samoopravným kódem. Další části práce jsou věnovány návrhu elektrického zapojení jednotky, její výrobě a návrhu firmwaru. Poslední část práce je věnována testování rádiového spojení jednotky. Realizované jednotky jsou uvedeny v příloze A.1.



# 1. Teoretický úvod

## 1.1 Komunikační rozhraní

Komunikační rozhraní zprostředkovává vzájemné spojení zařízení za účelem přenosu dat mezi sebou. *Rozhraní (interface)*, je soubor technických prostředků mezi vnějším prostředím a vnitřními obvody systému [2]. V zařízeních, pro bezdrátový sběr sensorových dat, se lze setkat s bezdrátovým a drátovým komunikačním rozhraním.

Bezdrátová komunikační rozhraní používají elektromagnetické vlnění pro přenos dat mezi dvěma a více zařízeními. Data jsou modulována na nosnou elektromagnetickou vlnu do vyhrazeného kmitočtového pásma. Modulaci lze rozlišit na dva základní druhy. Prvním typem je modulace SC (Single Carrier), která používá jednu nosnou vlnu a druhým typem je modulace MC (Multi Carrier), která používá více nosných vln [3]. Pro rádiový přenos sensorových dat je možné použít bezlicenční pásma ISM (Industrial, Scientific and Medical), kterým je v České republice například frekvenční pásmo 433 MHz. Pro bezdrátovou komunikaci je možné použít různé typy technologií jako je Bluetooth, Zigbee, Wi-Fi (Wireless Fidelity) nebo LoRa (Long Range). Na rádiovou komunikaci má vliv vysílací výkon vysílače, citlivost přijímače, zisk přijímací a vysílací antény a ztráty, které vznikají při šíření elektromagnetické vlny prostředím. Záleží vždy na daných podmínkách a požadavcích, která technologie bude nejvíc vhodná pro bezdrátový přenos sensorových dat.

S drátovým rozhraním je možné se setkat při přenosu dat mezi obvody v rámci jedné desky plošných spojů DPS, ve formě metalického vedení. Rozhraní je používáno pro komunikaci mikrokontroléru s další periferií obvodu. Mikrokontroléry bývají vybaveny rozhraním SPI (Seriál Peripheral Interface), USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver and Transceiver) nebo I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit).

### 1.1.1 Frekvenční pásmo 433 MHz

Podmínky využívání rádiových kmitočtů v České republice stanovuje Český telekomunikační úřad. Kmitočtové pásmo 433 MHz začíná na frekvenci 433,05 MHz a končí na 434,79 MHz. Toto spektrum kmitočtů je možné používat, bez licenčních poplatků, pro přenos dat za podmínky, že nebude hodnota vyzařovaného efektivního

výkonu  $P_{\text{ER}}$  vyšší než 10 dBm [4]. Hodnotu  $P_{\text{ER}}$  lze vypočítat podle vztahu

$$P_{\text{ER}} = P_{\text{TX}} - 2,15 - b + G_{\text{TX}}, \quad (1.1)$$

kde  $P_{\text{TX}}$  je výkon na výstupních svorkách vysílače,  $b$  je útlum mezi výstupními svorkami vysílače a připojenou anténou a  $G_{\text{TX}}$  je zisk antény. Další podmínkou používání je klíčový poměr 10 %, který povoluje zařízení aktivně vysílat pouze jednu desetinu hodiny [4]. Zařízení může dohromady během jedné hodiny vysílat šest minut. Nevýhodou používání zařízení v tomto pásmu je, že vlivem volného sdílení frekvenčního pásma, může být provoz ovlivněn rušením od jiných zařízení z blízkého okolí.

Na trhu lze najít moduly, které umožňují bezdrátovou komunikaci v kmitočtovém pásmu 433 MHz. Tyto moduly v sobě integrují funkci přijímače a vysílači. Pro přenos dat, mezi modulem a mikrokontrolérem, jsou vybaveny drátovým komunikačním rozhraním.

### 1.1.2 Bluetooth

Bluetooth je bezdrátová komunikační technologie, která je definována standardem IEEE 802.15.1. Náleží do kategorie sítí krátkého dosahu WPAN (Wireless Personal Area Network). Nominální rádiový dosah Bluetooth je 10 metrů [5]. Dosah může nabývat hodnoty víc než 100 metrů, ale záleží na konkrétních provozních podmínkách [6].

Bluetooth funguje v ISM pásmu 2,4 GHz. Pro modulaci dat na elektromagnetickou vlnu využívá metodu s jednou nosnou vlnou, kterou je systém s rozprostřeným spektrem pomocí frekvenčního skákání FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). FHSS podle pseudonáhodné posloupnosti přeladuje kmitočet nosné vlny. Data jsou tak vysílána na několika frekvencích. Pseudonáhodná posloupnost musí být stejná ve vysílacím i přijímacím zařízení. Kmitočtové spektrum je rozděleno na 79 frekvencí s odstupem 1 MHz mezi sebou. Za jednu sekundu je provedeno 1600 změn frekvence nosné vlny [5]. Díky vysílání na více kmitočtech je Bluetooth odolnější vůči rušení.

Bluetooth používá nestrukturovanou síť pikonet, která se skládá v jeden okamžik maximálně z osmi aktivních zařízení. Jedno zařízení musí být hlavní (master) a ostatní jsou podřízená (slave). Všechny jednotky účastníci se stejné pikonet sítě jsou synchronizovány s hlavním zařízením. Je podporováno spontánní spojení mezi zařízeními, aniž by o sobě vyžadovaly podrobné znalosti. Podřízené stanice nemohou mezi sebou komunikovat. Bluetooth používá strukturu Scatternet, kdy je síť složena z více pikonet sítí. Některá zařízení mohou být součástí více pikonet sítí [5].

Nominální přenosová rychlost je 1 Mbit/s, která je sdílena mezi všemi účastníky pikonet sítě. Jedna stanice Bluetooth může mít maximální datovou rychlost 721 kbit/s [5].

### 1.1.3 Zigbee

Zigbee je bezdrátové přenosová technologie popsána standardem IEEE 802.15.4. Patří do sítí typu WPAN. Umožňuje přenos dat na vzdálenost 10-50 m. Ve volném prostoru je možné dosáhnout vzdálenosti 500 metrů, pokud je použita přijímací anténu se ziskem 10 dB a vysílací anténa se ziskem 15 dB [7].

Zigbee je provozováno ve třech ISM pásmech. Stejně jako Bluetooth, pracuje v pásmu 2,4 GHz. V Evropě je možné použít pásmo 868 MHz a v Severní Americe a Austrálii využít pásmo 915 MHz [7]. Zigbee používá metodu jedné nosné vlny, kterou je technika s přímým rozprostřeným spektrem DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). K přenášeným informačním bitům je přidána sekvence redundantních bitů, které mají pseudonáhodný charakter. Tato bitová posloupnost je pak modulována na nosnou vlnu. Informace je rozprostřena do větší části signálu, čímž je méně náchylný na chyby způsobené rušením. Pro ostatní zařízení se tento signál jeví jako šum [3].

Přenosová rychlost je v každém kmitočtovém pásmu odlišná. Pokud je využíváno pásmo 868 MHz, je hodnota přenosové rychlosti je 20 kbit/s, v pásmu 915 MHz je 40 kbit/s a nejvyšší rychlost je v pásmu 2,4 GHz, kde je 250 kbit/s [7].

### 1.1.4 Wi-Fi

Wi-Fi je širokopásmová bezdrátová technologie, která je popsána standardem IEEE 802.11. Wi-Fi je určena pro lokální síť WLAN (Wireless Local Area Network), pro zajištění síťového spojení v domácnostech nebo podnicích. Komunikaci lze provozovat běžně do nominální vzdálenosti 100 metrů [8].

Existuje několika variantách Wi-Fi standardů, mezi které patří například standart 802.11g a 802.11ac. Podle typu standardu je Wi-Fi provozováno v ISM pásmu 2,4 GHz nebo 5 GHz. K modulaci dat je použita metoda DSSS, která je zmíněna v sekci 1.1.3, nebo modulace založené na bázi ortogonálního multiplexu s frekvenčním dělením OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)[8]. Modulaci OFDM je binární sériový datový tok rozdělen na N skupin a přiřazen N nosným kmitočtům, které jsou vzájemně ortogonální. Posloupnost bitů je vyjádřena komplexním číslem, které vyjadřuje stav modulace. Jsou používány modulace QPSK nebo M-QAM. Soustava všech paralelních modulačních symbolů představuje obraz výsledného OFDM symbolu ve frekvenční oblasti. Hodnoty komplexních čísel jsou následně transformovány inverzní diskretní Fourierovou transformací IFFT, která z N komplexních čísel vypočte  $2 \times N$  vzorků reálného signálu v časové oblasti. Vzorky jsou převedeny do sériové posloupnosti a výsledný symbol je převeden do analogové formy.

Přenosová rychlost Wi-Fi se liší podle standardu. Například maximální rychlost verze IEEE 802.11g, která používá pásmo 2,4 GHz, je 54 Mbit/s. Nejvyšší přenosovou rychlostí 1,3 Gbit/s disponuje standard IEEE 802.11ac, který je provozován v pásmu 5 GHz [8].

### 1.1.5 LoRa

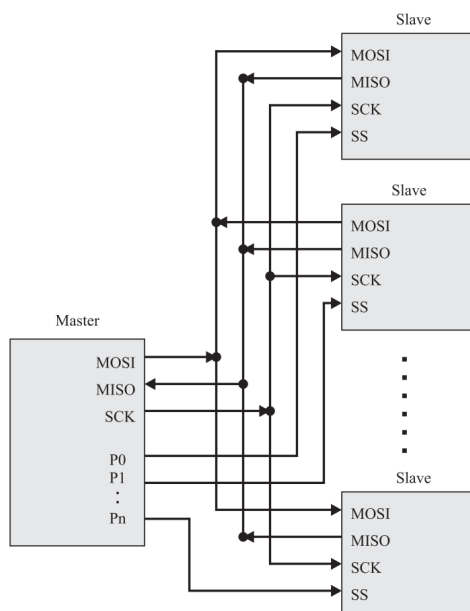
Systémem LoRa je určen pro bezdrátovou komunikaci na větší vzdálenosti. Patří do sítí typu WMAN (Wireless Metropolitan Area Network). Data lze přenášet na přímou viditelnost až do vzdálenosti 50 km a přibližně 5 km v městské zástavbě [9].

V Evropě je Lora provozována v kmitočtových ISM pásmu 868 MHz. K přenosu dat využívá systém s jednou nosnou vlnou, kterou je metoda rozprostřeného spektra CSS (Chirp Spread Spectrum) [10]. Rozprostřené spektrum je dosaženo prostřednictvím plynule se měnící frekvencí vysílaného generovaného signálu, který představuje modulovaná data. [11]

LoRa využívá adaptivní změnu rychlosti přenosu. Dokáže přijímat v jeden okamžik zprávy na více kmitočtových kanálech. V Evropě se přenosová rychlost pohybuje v rozsahu 250 bit/s až 5,5 kbit/s [10].

### 1.1.6 Rozhraní SPI

Rozhraní SPI se používá pro přenos dat mezi mikrokontrolérem a vnějšími perifériemi. SPI je synchronní a plně duplexní. Komunikace je založena na principu, kde je jeden řídicí obvod (Master) a více podřízených zařízení (Slave). Na obrázku 1.1 je princip koncepce systému. Přenos mezi řídicím obvodem a perifériemi probíhá podle synchronizačního signálu CLK (Clock). Data jsou z řídicího obvodu přenášena k podřízeným zařízením datovým vodičem MOSI (Master Out, Slave In). Opačný směrem jsou data přenášena vodičem MISO (Master In, Slave Out). Pro výběr aktivní periférie slouží signální vodič SS (Slave Select). Tímto vodičem lze vybrat zařízení, které bude komunikovat s řídicím obvodem [12].

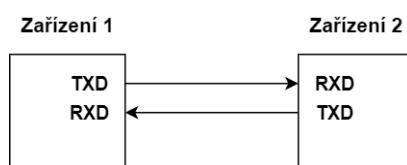


Obrázek 1.1: Celková koncepce systému se sběrnici SPI [12].



### 1.1.7 Rozhraní USART

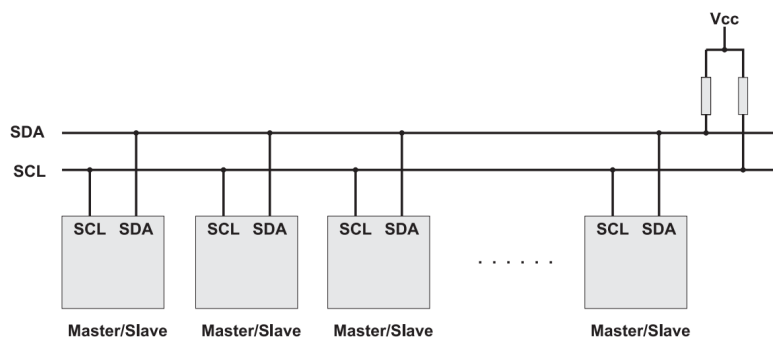
Rozhraní USART je určeno pro sériovou komunikaci mezi dvěma zařízeními. Lze ho nastavit do režimu synchronního nebo asynchronního přenosu dat [13]. Asynchronní komunikační metoda používá pro komunikaci dva datové vodiče. Vodič TXD (Transmit Data) pro vysílání dat a RXD (Receive Data) pro příjem dat. Synchronizace přenosu dat je realizována pomocí prvního (start) a posledního (stop) signálního bitu. Ty jsou v každém vysílaném bajtu. Asynchronní sériové komunikační subsystémy se označují jako UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) [13]. Koncept rozhraní je na obrázku 1.2. Synchronní sériová komunikace nepoužívá oproti asynchronní metodě pro synchronizaci první a poslední bit vyslaného bajtu, ale třetí vodič pro hodinový signál. Synchronní sériový komunikační systém se označuje jako SPI. [13]



Obrázek 1.2: Koncepte asynchronního rozhraní UART.

### 1.1.8 Rozhraní I<sup>2</sup>C

I<sup>2</sup>C slouží k připojení více periférií. Všechna zařízení propojena jedním datovým vodičem SDA (Serial Data) a hodinovým vodičem CLK pro jejich synchronizaci. Každé zařízení se může stát řídicím obvodem, ale komunikace nemůže být řízena více perifériemi ve stejnou dobu. Každé zařízení má unikátní adresu pro směrování komunikace mezi sebou. Na obrázku 1.3 je koncept zapojení s pull up rezistory. V klidovém stavu jsou oba vodiče díky pull up rezistorům v logické jedničce.



Obrázek 1.3: Celková koncepce sběrnice I<sup>2</sup>C [12].

## 1.2 Ukládání sensorových dat

Pro ukládání přijatých dat se jako první a nejjednodušší možnost nabízí paměťový prostor mikrokontroléru. Paměť mikrokontroléru je možné rozdělit na FLASH paměť pro program, vnitřní datovou paměť pro dočasné uložení dat typu RAM (Random Access Memory) a vnitřní datovou paměť typu EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory), která uchovává obsah i po odpojení napájení [14] a [15]. Kapacita paměti EEPROM mikrokontrolérů se pohybuje přibližně od 32 bytů do 16 kB [16]. Tato paměť není příliš vhodná pro sensorová data z hlediska kapacity, kdy je předpoklad ukládání většího množství dat. Pro zvýšení kapacity paměťového prostoru je možné připojit externí paměť EEPROM nebo paměťovou kartu.

Paměť EEPROM může být připojena k mikrokontroléru prostřednictvím rozhraní SPI nebo I<sup>2</sup>C. Na trhu je možné najít paměť EEPROM s kapacitou až 512 kB. Tou je například paměť M95M04-DR od firmy STMicroelectronics [17].

U projektů zahrnující ukládání sensorových dat může být paměť stále nedostačující, proto se v takovém případě používají paměťové karty [18]. Na trhu se lze setkat s kapacitou karty až 1 TB. Protože je karta vyjímatelná, tak umožňuje další externí zpracování dat. Existuje různé druhy standardů paměťových karet. Mezi převažující typy patří CF (CompactFlash) karta, MMC (Multimedia card) karta a SD (Secure Digital) karta [18]. Tyto druhy karet jsou nadále vylepšovány a vznikají nové standardy karet, které jsou od těchto původních odvozeny.

### 1.2.1 CF karta

Formát karty CF používá konektor o padesáti kontaktech. Pro komunikaci používá paralelní rozhraní ATA, které podporuje kapacitu karty až 137 GB [18]. Rychlost datového přenosu verze 6 je pro zápis dat 115 MB/s a 80 MB/s pro čtení. Kapacita verze 6 se pohybuje v řádu desítek GB [19].

### 1.2.2 MMC karta

Tento typ karty disponuje sedmi kontakty pro její připojení. Existují rozměrově zmenšené formáty karty, kterými jsou formáty MMCmobile a MMCmicro. Rychlost čtení karty je 52 MB/s a rychlost zápisu je 10 MB/s. Rychlost je omezená rychlostí NAND čipů v kartě. Maximální kapacita podporovaná formátem MMC je 2 TB [18].

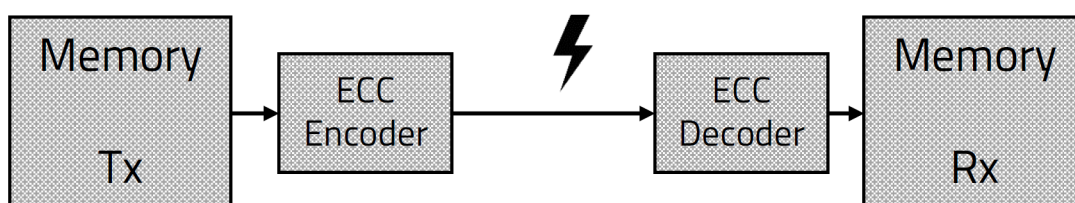
### 1.2.3 SD karta

SD formát karty má devět kontaktních ploch. Kromě formátu SD existuje ještě formát mini SD a micro SD. Karty mají stejný formát rozměrů jako MMC architektura. Výhodou SD karet je, že používají kompatibilní rozhraní pro kartu

MMC. Pak je možné použít ve slotu SD karty i MMC kartu, ale naopak nelze. SD kartu je možné připojit k mikrokontroléru v režimu SD nebo SPI. SD formát karty zahrnuje funkce pro zabezpečení média, aby nedocházelo k nedovolené replikaci dat [18]. Nominální rychlost čtení odvozeného formátu SDHC je až 170 MB/s. Rychlost zápisu dat je 90 MB/s. Kapacita karty může být až 1 TB.

### 1.3 Samoopravné kódy

Při přenosu informace prostřednictvím bezdrátové sítě působí s nejvyšší pravděpodobností na rádiovém spoj šum, který může způsobit chybu v přenášené informaci. Vlivem šumu je na přijímací straně signál zkreslen. Pro zajištění bezchybného přenosu dat se používají samoopravné kódy ECC (Error correction code), které umožňují detekovat určitý počet bitových chyb a jejich opravu, v závislosti na použitém typu algoritmu kódování. Podle typu kódování jsou k původní informačním bitům přidávány redundantní bity. Snaha je o co nejmenší počet redundantních bitů, protože snižují rychlost přenosu informačních bitů komunikačním kanálem. Principiální blokové schéma použití ECC kódu je na obrázku 1.4. Uložená data v paměti (Memory TX) jsou před odesláním zakódována v kodéru ECC. Kodér přidává k informačním bitům redundantní bity, generuje tzv. kódové slovo nebo kódový polynom, kde slovo nebo polynom představují konečnou posloupnost odeslaných znaků. Na přijímací straně je dekodovací blok ECC umístěn před pamětí. Přijaté kódové slovo je v dekodéru ECC vyhodnoceno a v případě chyby, je-li to možné, je chyba opravena. Poté jsou informační bity uloženy do paměti přijímače (Memory RX). Nicméně je důležité, že ECC kód nepředstavuje 100% ochranu dat, ale pouze k ní přispívá.



Obrázek 1.4: Blokové schéma zabezpečení přenosu [21].

Existuje několik typů ECC algoritmů pro ochranu a obnovu poškozených dat. Mezi podstatnou skupinu samoopravných kódů patří lineární a cyklické kódy [20]. Oproti lineárním algoritmům jsou cyklické složitější, ale umožňují detekovat shluk chyb. Ve vestavených systémech se používá lineární Hammingův kód, který umožňuje korekci chybného bitu vysílaného bitového slova, při použití malého množství kontrolních bitů [21].

Pro samoopravné kódy jsou zavedeny pojmy kód  $K$ , Hammingova váha a kódová vzdálenost  $KVZD$  [20]. Kód  $K$  představuje množinu všech kódových slov, které

generuje kódér. Hammingova váha je počet nenulových bitů kódového slova a kódová vzdálenost se rovná nejmenší hodnotě váhy kódových slov. Pokud je vzdálenost KVZD rovna nějak hodnotě  $H$ , pak počet detekovatelných chyb  $D_{CH}$  je menší, než je hodnota vzdálenosti  $H$ . Počet opravitelných chyb  $O_{CH}$  je menší než polovina hodnoty  $H$  [20]. Závislost mezi detekovatelnými a opravitelnými chybami je dána vztahem podle rovnice

$$O_{CH} < KVZD - D_{CH}. \quad (1.2)$$

Pokud bude hodnota vzdálenosti  $KVZD$  tři, pak podle rovnice 1.2 je možné detekovat dvě chyby a žádnou neopravit, nebo detekovat a opravit právě jednu chybu.

### 1.3.1 Lineární kódy

Jedná se o kódy, kde kódová slova tvoří lineární prostor nad prvky konečného tělesa  $\mathcal{A}$ . Pro binární kód se jedná o dvouprvkové těleso s prvky 0 a 1. Pokud je binární kód  $K$  podprostorem tělesa  $\mathcal{A}_n^2$  o dimenzi  $k$ , tak je kód  $K$  nazván lineárním  $(n, k)$  kódem, kde  $n$  je celkový počet bitů kódového slova a  $k$  je počet informačních bit [20]. Rozdíl  $n - k$  je počet kontrolních bitů.

Pro převod informačních bitů na kódové slovo se používá Generující matice  $\mathbf{G}$ , která je tvořena bází kódu, pro generování kódových slov. Matice je typu  $(k, n)$ , jestliže je použit kód typu  $(n, k)$ . Rovnice

$$\vec{b} \cdot \mathbf{G} = \vec{c}, \quad (1.3)$$

vyjadřuje vztah mezi informačním slovem  $\vec{b}$ , generující maticí  $\mathbf{G}$  a kódovým slovem  $\vec{c}$ . Kódové slovo získáme vynásobením informačního vektoru s generující maticí.

Pro dekódování kódovaného slova a vyhodnocení, zda došlo k chybě a na které pozici, se na přijímací straně používá Kontrolní matice  $\mathbf{H}$ . Ta je generující maticí ortogonálního podprostoru k matici  $\mathbf{G}$ . Pro kód typu  $(n, k)$  je matice typu  $(n, n - k)$ . Matice obsahuje ve sloupcích všechny kombinace prvků 0 a 1, kromě kombinace samých nul. Každá kombinace se vyskytuje pouze jednou. Mezi generující maticí a kontrolní platí vztah

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{H}^T = \vec{0}. \quad (1.4)$$

Ze vztahu 1.4 plyne, že stačí znát pouze matici  $\mathbf{H}$ , pomocí které je možné zakódovat informační bity ve vysílači a v přijímači vyhodnotit. Přijaté slovo je vyhodnoceno podle vztahu

$$\vec{w} \cdot \mathbf{H}^T = \vec{s}, \quad (1.5)$$

kde  $\vec{w}$  je přijaté slovo a  $\vec{s}$  je syndrom. Syndrom je závislý pouze na chybě. Pokud je syndrom nulový, je i chyba nulová a přijaté slovo odpovídá odeslanému slovu. Pokud na slovo zapůsobila chyba během přenosu, pak je syndrom nenulový. Pak, podle hodnoty syndromu, je možné detekovat pozici chybného bitu, kde došlo pravděpodobně k chybě.

### 1.3.2 Cyklický kód

Pro cyklický kód platí, že je lineární a pokud je  $\vec{c} = \{c_0, c_1, \dots, c_n\}$  kódové slovo o délce  $n$ , tak i posunutý kód  $\vec{v} = \{c_1, c_2, \dots, c_n, c_0\}$  je kódovým slovem [20]. Oproti lineárním kódům není kódové slovo vnímáno jako vektor, ale pro popis se používá polynom o délce  $n$  ve tvaru

$$p(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_{n-1}x^{n-1}, \quad (1.6)$$

kde koeficienty  $a_n$  nabývají hodnoty 0 nebo 1 pro binární typ kódu. Posun polynomu je uskutečněn vynásobením polynomu  $p(x)$  polynomem  $x$ , kdy po vynásobení platí pro prvek  $x^n$ , že je roven prvku  $x^0$ , neboli se posune z nejvyššího možného stupně polynomu na nejnižší. Opakujícím se násobením polynomu  $p(x)$  polynomem  $x$  dochází k cyklické rotaci prvků.

Stejně jako lineární kód má generující matici, cyklické kódy mají generující polynom  $g(x)$ . Tím je nenulový polynom stupně  $n - k$  pro cyklický  $(n, k)$  kód. Generující polynom má tu vlastnost, že dělí beze zbytku polynom  $x^n - 1$ . Podle toho lze ověřit, že se jedná o generující polynom. Informační bity jsou zakódovány podle rovnice

$$p(x) \cdot g(x) = c(x), \quad (1.7)$$

kde je  $p(x)$  polynom reprezentující informační bity,  $g(x)$  je generující polynom a  $c(x)$  je kódový polynom. Kontrolní polynom  $h(x)$  je roven hodnotě dvojčlenu  $x^n - 1$  vyděleného generujícím polynomem  $g(x)$ . Pro dekodování lze použít, místo kontrolní matice, generující polynom podle vztahu

$$\frac{w(x)}{g(x)} = s(x), \quad (1.8)$$

kde  $w(x)$  je přijatý kódový polynom a  $s(x)$  je syndrom. Cyklický  $(n, k)$  kód dovoluje detekovat chyby až do délky  $n - k$ . Pro opravu jednotlivých chyb je dekodérem opravována chyba podle předem vytvořené tabulky, ve které je pro každou jednu bitovou chybu vypočítán syndrom. Jedná se o paměťově náročnější metodu, kdy je potřeba pro každý kódový polynom prohledávat tabulku. Pokud je syndrom nulový, pak je přijatý polynom bez chyby.

### 1.3.3 Hammingův kód

Hammingův kód dokáže detekovat a opravit jednu chybu. Bývá využíván při přenosu sensorových dat, kdy není přenášeno velké množství dat [21]. Funguje na bázi vypočtu  $n - k$  sudých parit podle zadané kontrolní matice  $\mathbf{H}$ , která tvoří nanejvýš  $2^{n-k} - 1$  různých sloupců, kromě nulového [20]. Algoritmus Hammingova kódu generuje kontrolní bity pomocí funkce XOR. Pro minimální počet kontrolních bitů platí vztah

$$n = 2^{n-k} - 1, \quad (1.9)$$

podle kterého je Hammingův kód například typu (7,4). Kód typu (7,4) může být aplikován nanejvýš pro zakódování čtyř informačních bitů.

Při použití Hammingova kódu k zakódování čtyř informačních bitů jsou informační bity doplněny o tři kontrolní paritní bity. Pro detekování a opravu jedné chyby musí být hodnota vzdálenosti  $KVZD$  nejméně 3, podle vztahu 1.2. Tuto podmínku splňuje matice

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} p_1 & p_2 & d_1 & p_3 & d_2 & d_3 & d_4 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1.10)$$

kteřá může být použita pro tento typ kódu. Tato matice se vyznačuje tím, že řešením rovnice 1.4 je kontrolní matice  $\mathbf{H}$ , která je totožná s  $\mathbf{G}$ . Sloupce matice označené  $p_1, p_2$  a  $p_3$ , kde se vyskytuje pouze jedna jednička ve sloupci, představují bitovou pozici kontrolních paritních bitů. Pozice sloupců označené  $d_1, d_2, d_3$  a  $d_4$  reprezentují informační bity. Na první, druhé a čtvrté pozici, podle pořadí sloupců zleva, se nachází paritní bity v sedmibitovém slově. Zbylé pozice jsou obsazeny informačními bity, taktéž podle pořadí sloupců. Výpočet kontrolních bitů odpovídá výpočtu sudých parit pomocí funkce XOR. Paritní bity jsou vypočteny podle rovnic

$$p_1 = d_1 \oplus d_2 \oplus d_3, \quad (1.11)$$

$$p_2 = d_1 \oplus d_3 \oplus d_4, \quad (1.12)$$

$$p_3 = d_2 \oplus d_3 \oplus d_4, \quad (1.13)$$

kde  $p_1, p_2$  a  $p_3$  jsou kontrolní bity vypočtené ve vysílači [21]. V přijímači jsou stejným způsobem vypočteny nové paritní bity  $r_1, r_2$  a  $r_3$  podle rovnic

$$r_1 = d_1 \oplus d_2 \oplus d_3, \quad (1.14)$$

$$r_2 = d_1 \oplus d_3 \oplus d_4, \quad (1.15)$$

$$r_3 = d_2 \oplus d_3 \oplus d_4. \quad (1.16)$$

Pro ověření, zda byla bitová posloupnost přijatá s bitovou chybou, je vypočten syndrom podle rovnic

$$s_1 = p_1 \oplus r_1, \quad (1.17)$$

$$s_2 = p_2 \oplus r_2, \quad (1.18)$$

$$s_3 = p_3 \oplus r_3, \quad (1.19)$$

kde  $s_1, s_2$  a  $s_3$  jsou bity syndromu, které udávají pozici chybného bytu, po převodu z binárního čísla na dekadické. Oprava je provedena pomocí logické operace negace. Pokud je syndrom nulový, data byla přijata bez chyby.

## 2. Návrh jednotky

Návrh jednotky je realizován za účelem sběru, přeposílání a ukládání sensorových dat od sensorového uzlu [1]. Pro komunikaci je použit stejný radiokomunikační modul, který používá sensorový uzel pro bezdrátový přenos dat. Pro návrh obvodového zapojení byl použit software Eagle 9.5.2 od společnosti Autodesk. Kompletní vypracované schéma je uvedeno v příloze A.4.

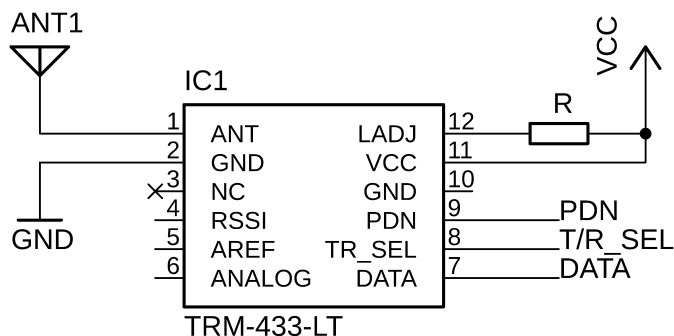
### 2.1 Sensorový uzel

Použitý sensorový uzel, podle [1], je napájen energií, kterou získává ze svého okolí. Je schopný vysílat každých 19 sekund, za podmínky, že je zařízení napájeno prostřednictvím fotovoltaického panelu o rozměru 5 cm x 2,5 cm při intenzitě osvětlení 8000 lx. S klesající intenzitou osvětlení se zmenšuje frekvence vysílání sensorových dat a zvětšuje se doba, kdy uzel není aktivní. Pokud byl sensorový uzel napájen prostřednictvím piezoelektrického měniče, vysílal vždy po šesti minutách. *Konkrétně byl měnič přilepen k 80 mm dlouhému a 25 mm širokému nosníku, vyrobeného z 1,5 mm silné FR4, který byl zatížen seismickým závažím 10 g a vibroval při 50 Hz s amplitudou 0,5 mm* [1] (překlad vlastní). Sensorový uzel používá pro přenos data radiokomunikační modul s obvodem TRM-433-LT, který pro rádiové spojení používá ISM pásmo 433 MHz. Obrázek sensorového uzlu je uveden v příloze A.2.

### 2.2 Radiokomunikační modul

Radiokomunikační modul používá pro bezdrátový přenos dat chip TRM-433-LT, který v sobě integruje funkci přijímače a vysílače. Výrobce [22] uvádí, že pro bezdrátový přenos dat používá kmitočet 433,92 MHz. Data jsou modulována dvouúrovňovou ASK (Amplitude-shift keying) modulací. Modul dovoluje generovat vysílací výkon signálu od -21 dBm do 11 dBm. Citlivost přijímače je -112 dBm. Chip neumožňuje data vysílat a přijímat ve stejnou dobu zároveň. Podle nastavení vstupního pinů T/R\_SEL pracuje v režimu vysílání nebo přijímání dat. Pinem PDN je vybrán pracovní nebo úsporný režim. Pin DATA je určen k obousměrnému přenosu informací prostřednictvím sériové linky. Na výstupním pinu RSSI je možné měřit napětí, které je úměrné výkonu (intenzitě) přijatého signálu. Obvod může být napájen napětím v rozsahu 2,1-3,6 V.

Koncept základního zapojení radiokomunikačního modulu je uvedeno na obrázku 2.1. K obvodu TRM-433-LT je připojena anténa o impedanci  $50 \Omega$ . Rezistorem R, který je zapojený mezi kontaktem LADJ a napájecím napětím, je regulován výsílací výkon. Modul je napájen napětí 3,3 V. Čip k přenosu dat používá pouze jednu sériovou linku. Obrázek použitého radiokomunikačního modulu je uveden v příloze A.3.



Obrázek 2.1: Základní zapojení obvodu TRM-433-LT.

## 2.3 Řízení jednotky

Pro řízení jednotky je použit mikrokontrolér ATmega328, kterým jsou ovládány připojené periférie a zpracovávány sensorová data.

ATmega328 je 8bitový mikrokontrolér založený na architektuře AVR (Advanced Virtual RISC). Výrobce [23] uvádí, že mikrokontrolér disponuje pamětí 1 kB EEPROM, 2 kB SRAM a 32 kB pamětí pro program typu FLASH. Lze využít funkci interního nebo externího přerušování, flexibilní časovače/čítače, 10bitový A/D převodník, programovatelný časovač watchdog s interním oscilátorem a analogový komparátor. Pro přenos dat je ATmega328 vybaven rozhraním SPI, TWI<sup>1</sup> a USART. Obvod lze napájet napětím 1,8-5,5 V.

Pro návrh jednotky je použita varianta ATmega328 v pouzdře 32 VQFN s třiceti dvěma vývody. Napájecí napětí je použito 5 V, čímž je nastavena napěťová úroveň výstupní logické hodnoty jedna na 5 V a hodnota logické nuly odpovídá napětí 0 V. Vstupní signál, pro vyhodnocení logické jedničky, musí dosahovat minimálně úrovně 3 V, podle [23]. Taktovací frekvence mikrokontroléru je nastavena pomocí externího oscilátoru 16 MHz.

K mikrokontroléru je připojen radiokomunikační obvod, který využívá k přenosu dat rozhraní mikrokontroléru USART. Protože čip k přenosu dat používá pouze jednu sériovou linku, je mezi modulem a mikrokontrolérem použit obvod, který přepíná spojení mezi datovou sběrnicí modulu a danou linkou sběrnice USART,

<sup>1</sup>Stejně rozhraní se skrývá pod názvem I<sup>2</sup>C, protože firma Microchip Technology používá označení TWI namísto chráněného označení I<sup>2</sup>C.



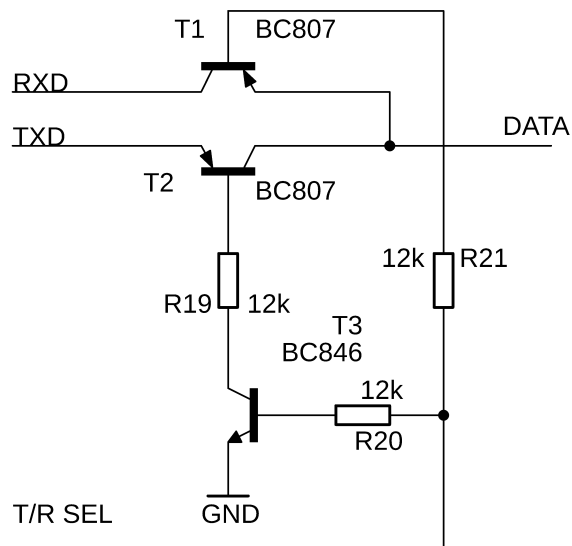
pro vysílání nebo přijímání dat. Prostřednictvím rozhraní SPI je připojena paměťová micro SD karta, respektive adaptér pro ukládání dat, a konektor ZL231-10pg pro připojení programátoru k nahrání firmwaru. Dále je připojen obvod reálného času RTC (Real Time Clock), který je spojen s mikrokontrolérem pomocí rozhraní TWI. K mikrokontroléru je připojen LCD displej sedmi datovými vodiči, který umožňuje interakci jednotky s uživatelem. Pro měření síly přijatého signálu, je výstupní pin RSSI modulu připojen k A/D převodníku mikrokontroléru na pinu číslo 22 (ADC7). Kompletní schéma zapojení je uvedeno v příloze A.4.

## 2.4 Přepínání datového spojení rádiového modulu

Protože, radiokomunikační modul používá k přenosu dat pouze jeden datový vodič DATA, je použito zapojení tří spínacích tranzistorů pro přepínání spojení s datovými vodiči RXD a TXD mikrokontroléru. Zapojení tranzistorů je na obrázku 2.2. Spínání tranzistorů je řízeno mikrokontrolérem pomocí vodiče připojeného k pinu T/R\_SEL radiokomunikačního modulu, kterým je nastavován také pracovní režim modulu na vysílání nebo přijímání dat.

$$|I_B| \geq \frac{|I_Z|}{h_{21E}}, \quad (2.1)$$

kde  $I_B$  je proud protékající bází tranzistoru,  $I_Z$  je kolektorový proud tranzistoru a  $h_{21E}$  je zesilovací činitel tranzistoru. Pokud platí tento vztah 2.1, tak se tranzistor chová jako řízený spínač.



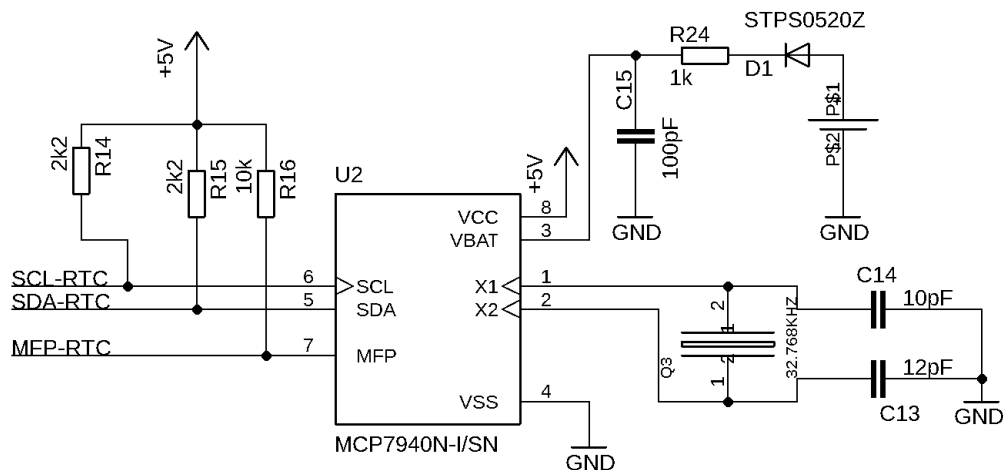
Obrázek 2.2: Řízený přepojovací obvod.

## 2.5 Ukládání dat

Pro záznam přijatých dat je použita paměťová micro SD karta, respektive adaptér typu Molex 502774-0891. Paměťová karta je napájena napětím 3,3 V, což znamená, že pracuje 3,3voltovou logickou úrovní na svých výstupních a vstupních pinech. Micro SD karta nabízí dvě možnosti připojení k mikrokontroléru, kterým je módu SD nebo SPI. Režim SD využívá všech osm pinů karty a je oproti SPI módu rychlejší, protože pro přenos dat používá současně tři datové vodiče, ale v režimu SPI je používán pouze jeden. Mód SPI používá pouze šest pinů karty a je jednodušeji realizovatelný. Režim SPI pro datový přenos používá oddělené datové linky pro každý směr toku dat. V této práci je použito zapojení paměťové karty pomocí SPI rozhraní.

## 2.6 Obvod reálného času

Aby mohla být přijatá data opatřena údajem o přesném datu a času příjmu i v případě odpojení jednotky od napájení, je navrženo obvodové řešení pro obvod reálného času MCP7940N podle výrobce [25]. Jedná se o nízkoenergetický čip, který je napájen napětím 5 V. V případě, že je napětí odpojeno, automaticky obvod přepíná na napájení z baterie, která je použita jako záložní zdroj. Tím je zajištěno, že nebude kalendář nebo hodiny obvodu resetovány. Chod hodin je taktován pomocí krystalu 32,768 kHz. Čip MCP7940N pro komunikaci s mikrokontrolérem disponuje sběrnici TWI. Schéma zapojení je na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Zapojení obvodu reálného času.

## 2.7 Displej

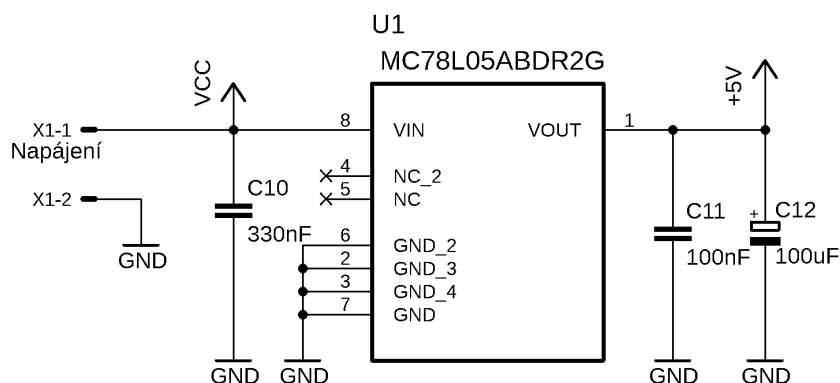
Pro zobrazení přijatých informací je použit LCD displej EA W162B-N3LW, který zobrazuje data ve dvouřádkovém zobrazení o šestnácti znacích. Displej je napájen napětím 5 V. Displej používá rozhraní HD44780. Pro přenos dat mezi displejem a mikrokontrolérem slouží čtyři datové vodiče DB4, DB5, DB6, a DB7. K řízení displeje jsou použity vstupy E, R/W a RS. Kontrast je řízen trimrem 10 k $\Omega$ .

## 2.8 Napájecí obvody

Jednotka je napájena externím zdrojem stejnosměrného napětí 12 V. Použité obvody v zařízení jsou napájeny napětím o úrovni 5 V nebo 3,3 V. Tyto úrovně napětí jsou vytvořena prostřednictvím dvou lineárních stabilizátorů napětí. Pro napětí 5 V je použit stabilizátor MC78L05 a pro napětí 3,3 V je použit LF33CDT. Je použito paralelní zapojení stabilizátorů, ve kterém nemusí být regulátory obecně dimenzovány na tak vysoký proud, jako v případě sériového zapojení, kdy by první regulátorem protékal součet proudů paralelního zapojení obou regulátorů.

### 2.8.1 Obvod MC78L05

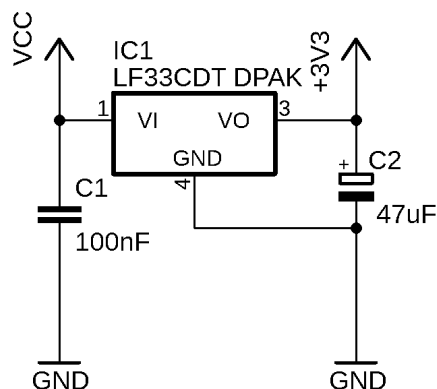
Obvod MC78L05 je běžný lineární regulátor napětí, který je snadno použitelný v mnoha aplikacích, kde je vyžadován výstupní proud do 100 mA. Obvod je vybaven vnitřním omezením proudu a vypnutím v případě přehřátí, což ho činí velice odolný. Regulátor nevyžaduje mnoho externích komponent pro jeho funkci podle výrobce [26]. Použité zapojení je na obrázku 2.4. Je použit 8 pinový obvod v pouzdře SOIC-8, zapojený podle katalogu [26]. K regulátoru jsou připojeny keramické kondenzátory C10 a C11 a tantalový C12. Kondenzátor C10 = 330 nF je umístěn na vstupu regulátoru pro jeho stabilizaci. Kondenzátor C11 = 100 nF na výstupu není nutný pro stabilizaci obvodu, ale vylepšuje přechodovou odezvu. Kondenzátor C12 = 100  $\mu$ F je použit na výstupu pro stabilizaci výstupního napětí.



Obrázek 2.4: Schéma zapojení obvodu MC78L05 - 5 V.

## 2.8.2 Obvod LF33CDT

Stabilizátor LF33CDT se vyznačuje nízkým úbytkem napětí 0,45 V [27]. Schéma zapojení regulátoru je na obrázku 2.5. Pro stabilitu obvodu je na vstupu připojen kondenzátor  $C1 = 100 \text{ nF}$ . Pro stabilizaci výstupního napětí je použit tantalový kondenzátor  $C2 = 47 \mu\text{F}$ .



Obrázek 2.5: Schéma zapojení obvodu LF33CDT - 3,3 V.

## 2.9 Rozdílné logické pracovní úrovně obvodů

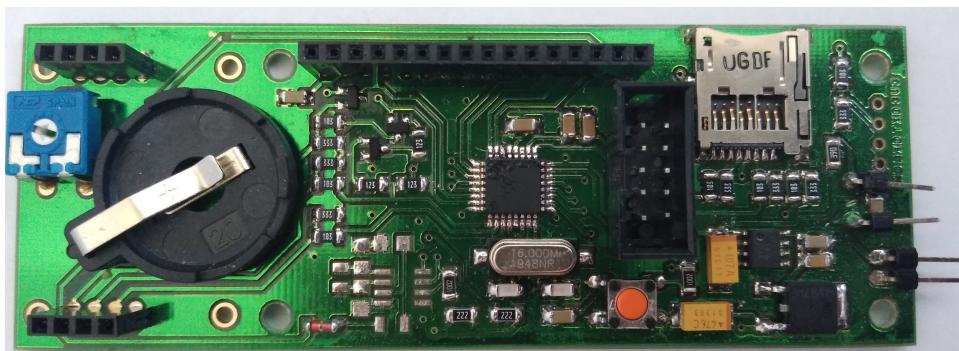
Mikrokontrolér a periferie TRM-433-LT a micro SD karta pracují s rozdílnou úrovní napětí pro logickou jedničku. Mikrokontrolér používá 5voltovou logikou. Radiokomunikační modul a paměťová karta pracují s 3,3voltovou logikou. Signál směřující k mikrokontroléru ATmega328 o úrovní 3,3 V dosahuje požadované hodnoty, podle [23]. Pro směr komunikace od mikrokontroléru ke komunikačnímu modulu nebo k micro SD kartě je použit napěťový dělič ze dvou rezistorů pro snížení úrovně signálu na vodičích z 5 V na 3,3 V.

### 3. Realizace jednotky

Podle elektrického schématu byla navržena a realizována deska plošných spojů DPS v softwaru Eagle, ve kterém byl převeden elektrický výkres do výkresu desky plošných spojů.

Byla navržena dvouvrstvá DPS deska o šířce 40,63 mm a výšce 111,74 mm. Dimenze desky byla dána rozměry LCD displeje a komunikačního modulu. Tyto periferie se nenachází na DPS, ale jsou k desce připojeny pomocí konektorů ze shora desky. Součástky byly umístěny na jednu stranu DPS. Napájecí obvody byly umístěny k jedné straně desky. Tloušťka všech spojů je 35  $\mu\text{m}$ . Nejmenší použitá šířka spoje je 0,4064 mm. Ta může být zatížena proudem až 1,3 A [28]. Minimální šířka mezery mezi spoji je 0,3 mm. Tato hodnota splňuje podmínku šířky mezery 0,4  $\mu\text{m}$  na jeden volt pro stejnosměrné napětí do 50 V podle [28]. Délka spojů byla co nejvíce minimalizována pro minimalizaci odporu a tím případný nárůst ztrát a teploty. Pro snížení vlivu vysokofrekvenční rušení a vzniku parazitních projevů byly použity zemnicí plochy v obou vrstvách. Části spojů, které nejsou pájeny, jsou překryty ochrannou vrstvou, čímž jsou chráněny před mechanickým poškozením. Kontakty jsou pokoveny zlatem.

Navržené schéma spojů horní strany desky je v příloze A.5, schéma spojů dolní strany desky je v příloze A.6 a rozmístění součástek na horní straně desky je v příloze A.7. Externí firmou byly vyrobeny tři desky DPS, které byly ručně osazeny. Obvod RTC nebyl osazen, nebylo uvažováno jeho použití. Na obrázku 3.1 je realizovaná deska DPS osazená součástky.



Obrázek 3.1: Deska jednotky osazená součástky.



## 4. Návrh firmwaru

Pro jednotku byl navržen firmware v prostředí Atmel studio 7.0, v jazyce C. Při návrhu byly registry mikrokontroléru nastaveny podle literatury [23] a [24]. Pro ovládání LCD displeje a paměťové karty byly použity již vytvořené knihovny. Pro rozhraní HD44780U displeje byly použity soubory lcd.c a lcd.h od autora Peter Fleury a pro micro SD kartu soubory diskio.c, diskio.h, ff.c, ff.h, ffconf.h a integer.h od autora ChaN. V knihovnách bylo změněno nastavení portů, podle připojení daných periférií.

Navržený firmware umožňuje jednotce přijímat data ze sensorového uzlu, ukládat je na paměťovou kartu, znovu vysílat a zobrazit je na displeji společně s časem, který udává dobu od spuštění jednotky. Program je rozdělen na hlavní program a dva podprogramy přerušení USART RX a TIMER1 COMPA. Přerušení USART RX je vyvoláno při přijetí dat na rozhraní USART. Přerušení TIMER1 COMPA je vyvoláno naplněním čítače 1, které nastane každou jednu třetinu sekundy. Toto přerušení se uplatňuje při odesílání dat, podle předem přiřazeného časového intervalu, a k nastavení času. Na bezdrátově přenášena data je aplikován samoopravný Hammingův kód (7,4), podle sekce 1.3.3.

Firmware sensorového uzlu vysilac.c, od autorů Michal Kočí a Adam Bouřa, byl pozměněn, aby bylo vysílání sensorových dat kompatibilní s přijímací jednotkou. Byla nastavena přenosová rychlost sériového rozhraní na 10 kbit/s a na přenášena data byl použit Hammingův kód.

### 4.1 Časová synchronizace

Po zapnutí jednotky je synchronizován její čas s další jednotkou v rádiovém dosahu. Při synchronizaci jsou mezi jednotkami vyměněny čtyři zprávy. Jednotka nejdříve odesílá žádost o synchronizaci. Pokud jednotka nedostane odpověď, nedochází k synchronizaci a jednotka si ponechá čas, který byl spuštěn při inicializaci. V případě, že se nachází další jednotka v dosahu, dostane od ní první jednotka odpověď s časem  $T$ , který si nastaví. Čas  $T$  je zpožděný za reálným časem, proto první jednotka po nastavení času vysílá další zprávu. Ta obsahuje čas vysílání  $T_1$ . Druhá jednotka tuto zprávu přijme v čase  $T_2$  a vypočítá odchylku  $\delta_1$  podle vztahu

$$\delta_1 = T_2 - T_1. \quad (4.1)$$

Tuto odchylku odesílá k první jednotce společně s časem vysílání  $T_3$ , která tuto

zprávu přijme v čase  $T_4$  a vypočte korekci času  $K$  podle vztahu

$$K = \frac{\delta_1 - (T_4 - T_3)}{2}. \quad (4.2)$$

Na displeji je zobrazeno písmeno S, pokud je jednotka synchronizována. Časová synchronizace se uplatňuje při příjmu sensorových dat od jednotky, kdy jsou data rozlišována podle času příjmu. Dále se uplatňuje při vysílání, kdy je každé jednotce přiřazen jeden časový interval v časovém úseku dvou sekund pro vysílání, aby se jednotky navzájem nerušily.

## 4.2 Vysílací interval

Aby nedocházelo k tomu, že v jeden okamžik budou vysílat současně dvě jednotky ve vzájemném rádiovém dosahu, má každá jednotka přidělený časový vysílací interval.

Pro vysílání je vytvořeno primárně čtyři časové intervaly. V případě, že by byly v rádiovém dosahu další čtyři jednotky, budou mít tyto jednotky přiděleny stejné časové intervaly, ale vysílat budou se zpožděním 50 ms. Celkem tedy osm možných časových intervalů. Časové intervaly jsou realizovány pomocí přerušení TIMER1 COMPA, generované při naplnění čítače 1. K vyvolání podprogramu přerušení dochází každou jednu třetinu sekundy, kterou jsou dvě sekundy rozděleny na šest intervalů. Pro vysílání jsou určeny intervaly 1,2,4 a 5. Pokud nastane interval 0 nebo 3, tak nedochází k vysílání dat, ale nastane změna času o jednu sekundu. Hodnota aktuálního intervalu, určeného pro vysílání, je po vyvolání podprogramu inkrementována. Pokud před inkrementací je hodnota intervalu 5, pak je interval místo inkrementace nastaven na interval číslo 0. Během dvou sekund může každá jednotka začít vysílat data pouze jednou.

Nastavení intervalu probíhá již během časové synchronizaci, kdy jednotka dostane informaci o hodnotě intervalu druhé jednotky a nastaví si další hodnotu intervalu. Po časové synchronizaci jednotka vysílá zprávu, aby ověřila, zda se v okolí nenachází jednotka se stejným interval. Jednotky v rádiovém dosahu posílají v odpovědi svůj časový interval. Jednotka si pak vybere dostupný interval o nejnižší hodnotě.

## 4.3 Popis činnosti jednotky

Po spuštění je jednotka inicializována. Při inicializaci jsou nastaveny porty mikrokontroléru, rozhraní USART a SPI, A/D převodník, LCD displej, paměťová karta a přerušení USART RX a TIMER1 COMPA. Rozhraní USART je nastaveno na asynchronní režim přenosu dat o rychlosti 10 kbit/s. A/D převodník používá referenční napětí 5 V na portu  $AV_{CC}$  mikrokontroléru.



Poté probíhá synchronizace, kdy je synchronizován čas jednotek a přidělen časový interval pro vysílání. Jednotlivé synchronizační zprávy jsou odesílány opakovaně, dokud jednotka nepřijme odpověď od druhé jednotky. Jestliže jednotka nedostane odpověď, přestane vysílat data po deseti cyklech vysílání, v přiděleném vysílacím intervalu. Pro úspěšné dokončení a urychlení synchronizace, jsou tyto zprávy odesílány dvakrát během jednoho intervalu. Sensorová data jsou přeposílána automaticky v pěti cyklech, jednotka neočekává odpověď od druhé jednotky. Při vysílání je nejdříve odesílána posloupnost identifikačních bitů, která slouží k identifikaci, zda se jedná o data od senzoru nebo jednotky. Poté jsou odesílána informační data. Vyslaná posloupnost bitů je zakončena kontrolním součtem o osmi bitech. Na bezdrátově přenášená data je aplikován Hammingův samoopravný kód (7,4), podle sekce 1.3.3. Pro výpočet paritních bitů a syndromu jsou v jednotce použity rovnice 1.11-1.19. Přijatá sensorová data jsou jednotkou uložena do paměťové karty, společně s časem a napětím detekovaným A/D převodníkem, ve formátu textového souboru. Struktura uložených dat je na obrázku 4.1. Data jsou pak jednotkou znovu odesílána. Pokud byla data jednotkou již přijata, nedochází k jejich vysílání, aby nedocházelo k cyklickému přeposílání. K detekci, zda byla data již jednotkou přijata, je použit čas jejich přijetí od sensorového uzlu. Ten je zaznamenán při přijetí dat a poté je jednotkou odesílán společně s daty. Časová informace je porovnávána s posledním zaznamenaným časovým údajem přijatých dat v jednotce. Pokud se přijatý čas liší o více než 10 sekund od posledního příjmu dat, jsou data považována za nová. Rozlišení 10 sekund je dostačující vzhledem k předpokladu, že sensorový uzel vysílá každých 19 sekund za podmínek, jež jsou zmíněny v sekci 2.1.

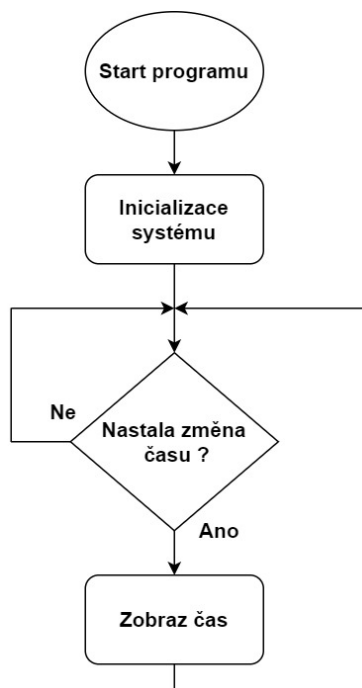
Na displeji je zobrazován aktuální čas, symbol „ S “ (jednotka je časově synchronizována), přidělený časový interval, přijatá teplota ze sensorového uzlu a její čas přijetí. Pokud byla sensorová data přijata úspěšně, je zobrazen text „ OK “. V jiném případě je zobrazen text „ NO “.

Linie	Čas	Teplota (°C)	Napětí (mV)
1	00:03:17	22.0 °C	1500 mV
2	00:03:26	22.0 °C	1485 mV
3	00:03:38	23.6 °C	1104 mV
4	00:03:47	24.8 °C	992 mV
5	00:04:09	23.1 °C	1236 mV
6	00:04:12	23.1 °C	1314 mV
7	00:04:26	23.6 °C	1344 mV

Obrázek 4.1: Data uložená v textovém souboru na paměťové kartě.

## 4.4 Struktura hlavního programu

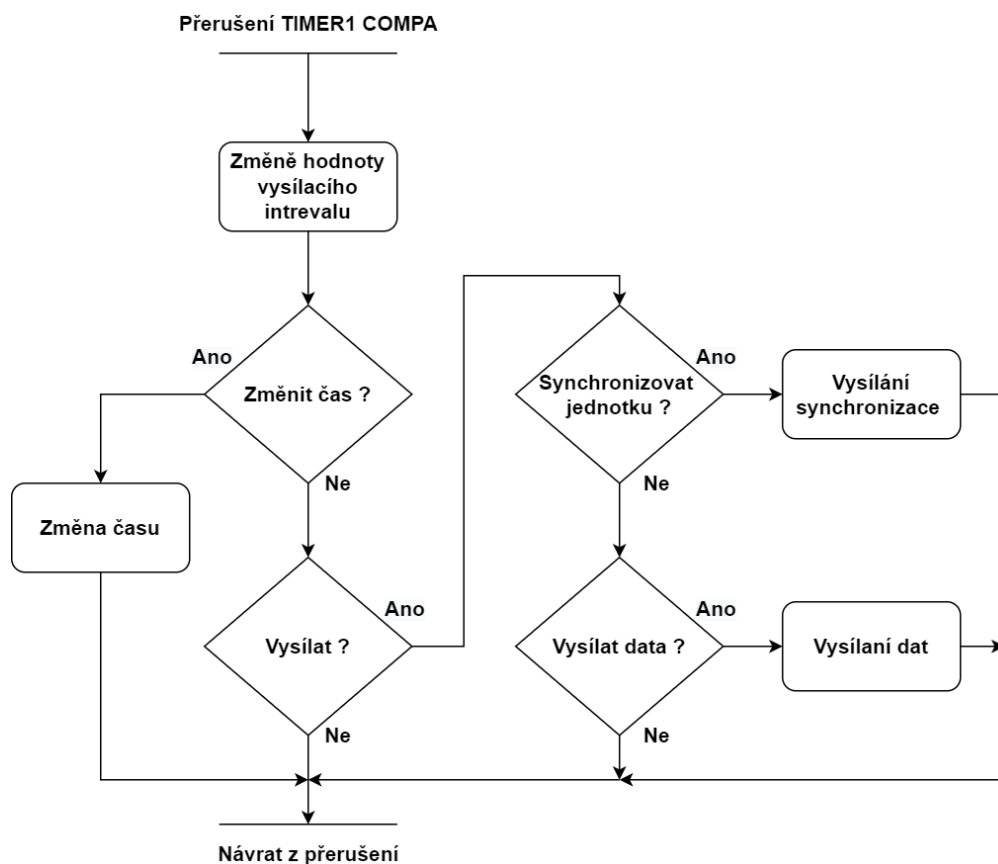
Na obrázku 4.2 je zjednodušený digram hlavního programu. Po připojení napájení je zařízení inicializováno. Poté systému přejde do nekonečné smyčky. Změna času na displeji je realizována během hlavního programu. Může vzniknout dočasná odchylka mezi zobrazeným a reálným časem jednotky při vyvolání přerušení USART RX. Výhodou je uvolněný časový prostor pro vyvolání přerušení při příjmu dat tím, že zobrazení času není uskutečněno během přerušení TIME1 COMPA.



Obrázek 4.2: Diagram hlavního programu.

## 4.5 Struktura podprogramu TIME1 COMPA

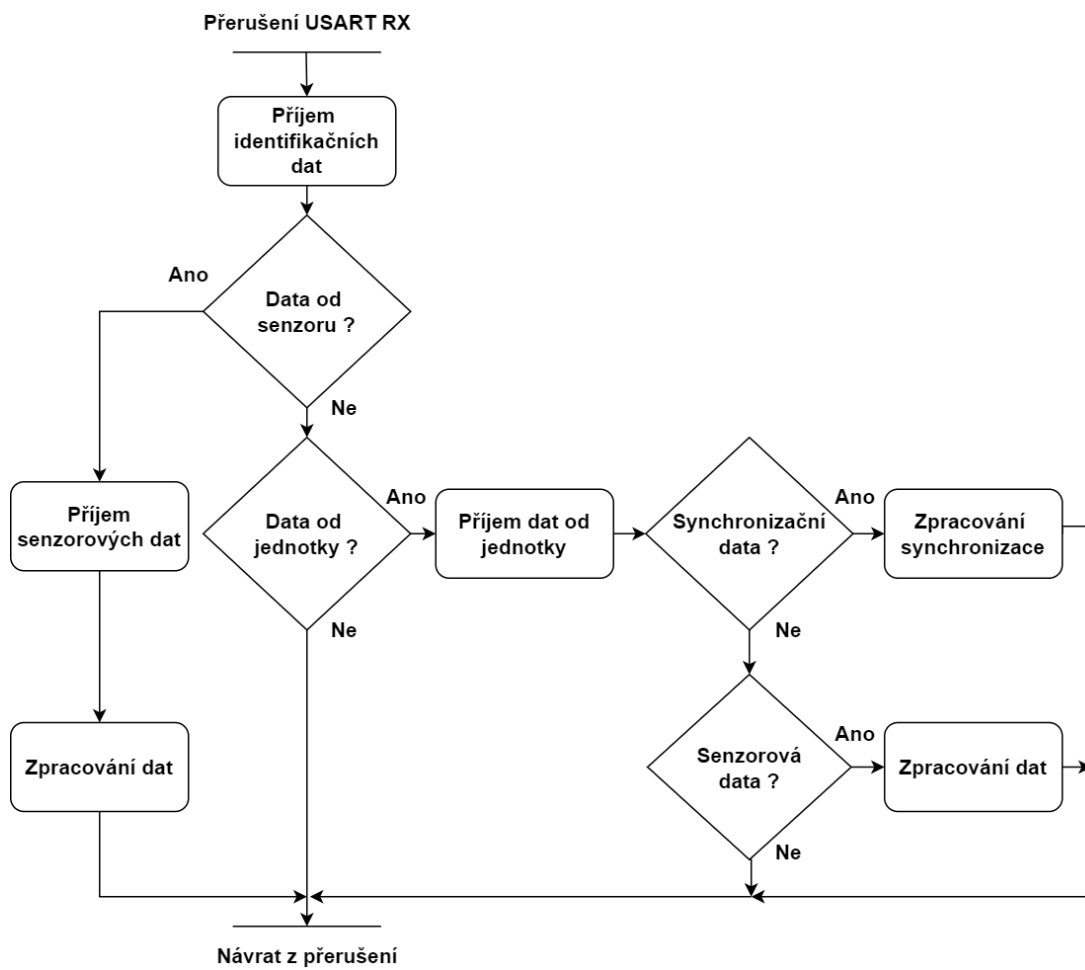
Podprogram je určen pro vysílání dat a ke změně času. Zjednodušený diagram podprogramu je na obrázku 4.3. Podprogram je vyvolán čítačem každou jednu třetinu sekundy. Na začátku dochází ke změně hodnoty vysílacího intervalu. Pokud nastal interval 0 nebo 3, je změněn čas o jednu sekundu. V ostatních případech je testováno, zda hodnota intervalu odpovídá okamžiku pro vysílání dané jednotky. Jestliže ano, je odesílána posloupnost bitů pro synchronizaci nebo přeposílána sensorová data nebo v případě, že nejsou dostupná žádná data k vysílání, je podprogram přerušení ukončen.



Obrázek 4.3: Diagram podprogramu TIME1 COMPA.

## 4.6 Struktura podprogramu USART RX

Podprogram je vyvolán při detekci dat na rozhraní USART. Podle přijaté identifikační posloupnosti bitů je rozhodnuto, zda se jedná o data od senzoru nebo od jednotky. Data od sensorového uzlu jsou uložena a připravena k přeposlání. V případě jednotky je ještě zjištěno, zda se jedná o data za účelem synchronizace nebo o sensorová data. Podle daného typu dat je přijatá posloupnost bitů zpracována. Zjednodušený diagram podprogramu je na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Diagram podprogramu USART RX.

## 5. Testování jednotky

Na zprovozněných jednotkách byla testována funkčnost firmwaru. Podle získaných výsledků, v podobě uložených dat na paměťové kartě a zobrazených informací na displeji, byla provedena optimalizace programu. Pro ověření, zda jednotka je schopná přijímat a ukládat data od sensorového uzlu bylo sestrojeno pracoviště, které obsahovalo jednu jednotku a vysílací sensorový uzel. Jednotka byla napájena napětí 12 V prostřednictvím externího adaptéru. Pro napájení sensorového uzlu byl použit monočlánek se spínačem. Při sepnutí spínače byl senzorem vyslán údaj o teplotě. Úspěšné přijetí a uložení dat bylo detekováno pomocí paměťové karty. Pro ověření časové synchronizace a nastavení vysílacího intervalu byly použity dvě jednotky. Při správné synchronizaci byly na displejích vypsány totožné časy a zobrazen symbol S a číslo intervalu na jednotce, která byla spuštěna později. Přeposílání sensorových dat bylo ověřeno pomocí dvou jednotek a jednoho sensorového uzlu. Jednotky byly umístěny do pozice, ve kterých byly v rádiovém dosahu, ale právě pouze jedna jednotka byla v dosahu sensorového uzlu.

Po úspěšném ověření firmwaru bylo provedeno měření rádiového dosahu, mezi vysílačem a přijímačem, pro různé typy prostředí.

### 5.1 Měření rádiového dosahu

Měření rádiového spoje bylo provedeno pro tři typy prostředí. Prvním měření bylo realizováno pro přímou viditelnost vysílače a přijímače. U druhého měření se nacházela překážka, v podobě budovy, mezi vysílačem a přijímačem. Poslední měření bylo uskutečněno uvnitř rodinného domu.

Měření byla uskutečněna pomocí vysílacího sensorového uzlu, který snímal teplotu prostředí, a přijímací jednotky, která detekovala A/D převodník intenzitu přijatého signálu v podobě napětí  $U_{SIG}$ . Ukládání dat s napětím umožnilo sledovat intenzitu přijatého signálu v závislosti na vzdálenosti vysílače a přijímače.

Pro každé jedno měření bylo detekováno alespoň deset hodnot, které byly zprůměrovány. Pro první a druhé měření platí, že vysílač a přijímač, v době měření, byly umístěny na plastovém podstavci o výšce 1 m.

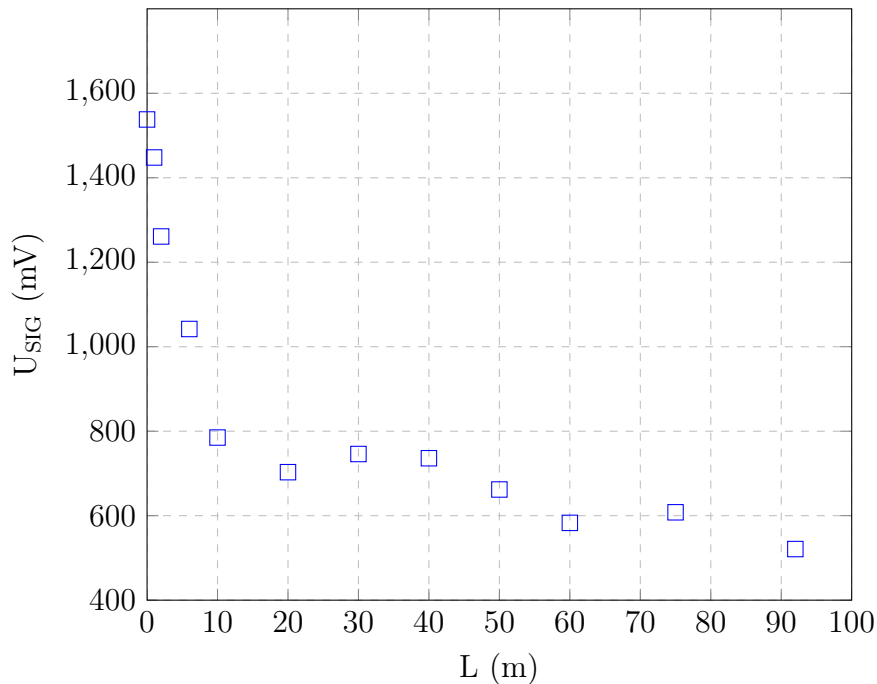
### 5.1.1 Měření při přímé viditelnosti zařízení

Při měření na přímou viditelnost byla změřena hodnota napětí  $U_{\text{SIG}}$  v závislosti na vzdálenosti  $L$ , mezi přijímačem a vysílačem, a hledána maximální vzdálenost rádiového spojení. Změřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1 a zobrazeny v grafu na obrázku 5.1.

Tabulka 5.1: Změřené hodnoty měření při přímé viditelnost

Č.m.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_{\text{SIG}}$ (mV)	1569	1477	1286	1062	801	717	761	750	675	595	620	532
$L$ (m)	0	1	2	6	10	20	30	40	50	60	75	89

Závislost napětí  $U_{\text{SIG}}$  na vzdálenosti  $L$  přijímače a vysílače



Obrázek 5.1: Graf závislosti napětí  $U_{\text{SIG}}$  na vzdálenosti  $L$  přijímače a vysílače.

Změřené hodnoty napětí  $U_{\text{SIG}}$  klesají s rostoucí vzdáleností  $L$ . Zobrazená změřená závislost hodnot, na obrázku 5.1, má exponenciální klesající charakter. Změřená hodnota napětí ve vzdálenosti 0 m je 1538 mV. Tato hodnota odpovídá přibližně výkonu -35 dBm, podle [22]. Při hledání maximální vzdálenosti se podařilo detekovat data od vysílače ve vzdálenosti 105 m, ale při opakovaném vysílání byla úspěšnost přijetí dat 0 %. Proto, při hledání maximální vzdálenosti byla stanovena

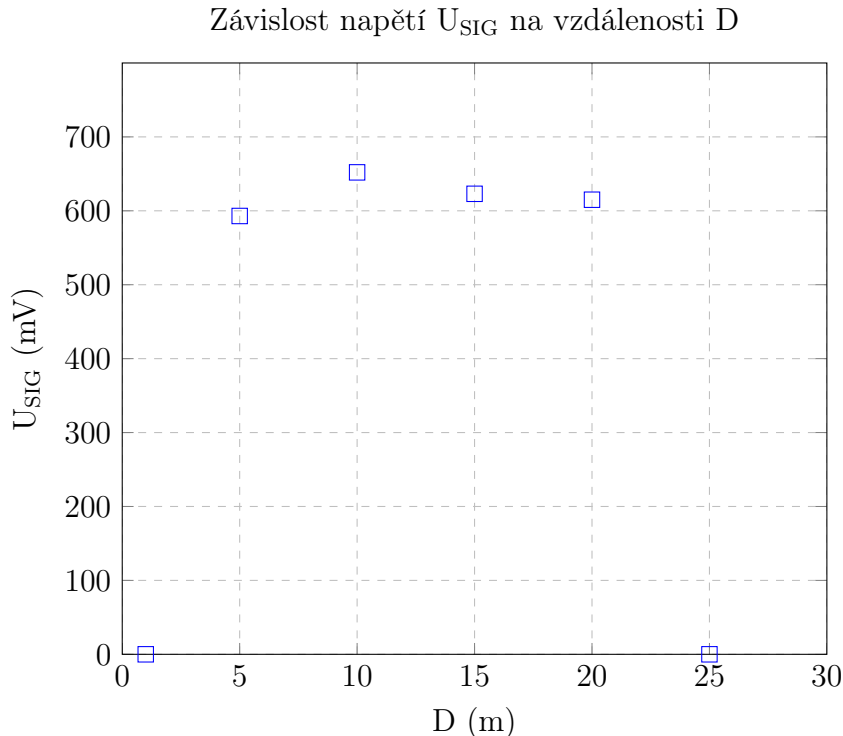
podmínka, aby data byla detekována alespoň s úspěšností 85 %. Tato podmínka byla splněna u vzdálenosti 89 m. Pro tuto vzdálenost byla změřena hodnota napětí 532 mV. Této hodnotě odpovídá výkon -106 dBm. Změřená závislost odpovídá chování elektromagnetické vlny, u které intenzita exponenciálně klesá s narůstající vzdáleností od zdroje.

### 5.1.2 Měření s překážkou

U tohoto měření se nacházela mezi vysílačem a přijímače budova o výšce 8 m a šířce 6,5 m. Vedle budovy se dále nacházel dřevěný včelín o výšce 2,5 m a šířce 3 m. Na obrázku v příloze A.8 je znázorněno měřené prostředí, kde bod 1 značí přijímač a bod 2 vysílač. Přijímač byl umístěn 25 metrů od budovy a na druhé straně budovy byl umístěn vysílač. Během měření byla pozorována závislost napětí  $U_{SIG}$  na vzdálenosti  $D$ , mezi vysílačem a budovou. Detekované hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.2. Jejich vzájemná závislost je zobrazena na obrázku 5.2.

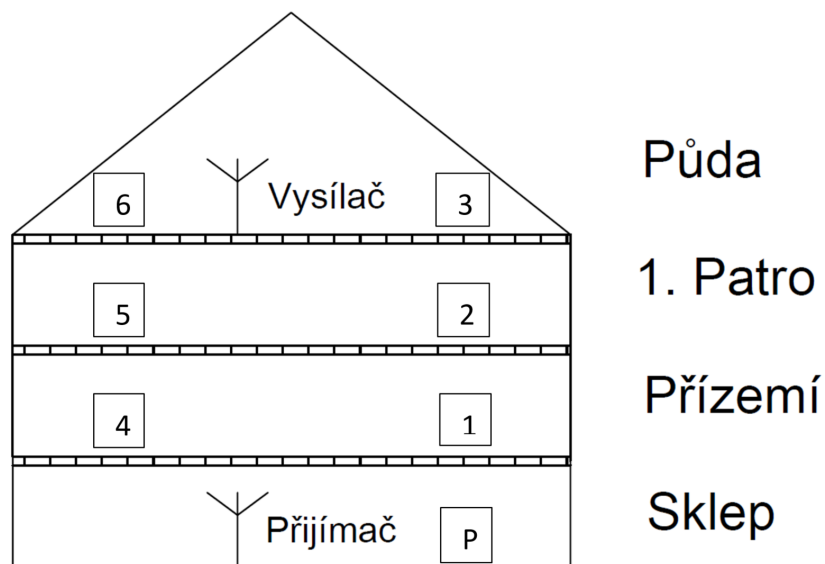
Tabulka 5.2: Změřené hodnoty měření s překážkou

Č.m.	1	2	3	4	5	6
$U_{SIG}$ (mV)	0	630	673	662	645	0
$D$ (m)	1	5	10	15	20	25



Obrázek 5.2: Graf závislosti napětí  $U_{SIG}$  na vzdálenosti  $D$ .

Hodnoty změřeného napětí mají rostoucí charakter při zvětšující se vzdálenosti vysílače od 1 metru k 10 metrům. Poté hodnoty napětí s rostoucí vzdáleností klesají. Budova snížila maximální vzdálenost rádiového spojení na 51,5 m. Na změřených hodnotách je možné sledovat snížení napětí (intenzity signálu), vlivem narušení rádiového spoje mezi přijímačem a vysílačem. Budova způsobila zakrytí Fresnelovy zóny, které zapříčinilo, že v blízkosti budovy nebyl signál vůbec detekován a byl snížen rádiový dosah spoje.



Obrázek 5.3: Měřící body uvnitř domu.

### 5.1.3 Měření uvnitř rodinného domu

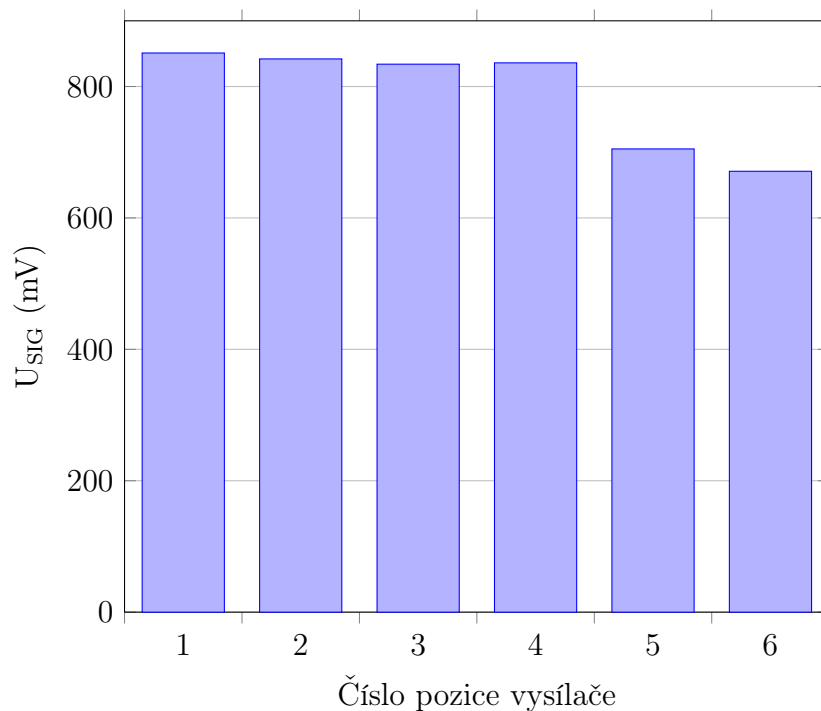
Měření bylo uskutečněno uvnitř čtyřpatrového domu. Přijímač byl umístěn ve sklepě, 50 cm nad podlahou v bodě P. Poté bylo měřeno napětí  $U_{SIG}$  v závislosti na poloze vysílače. Ten byl umístěný v šesti místech budovy, v bodě 1 až 6. Body měření 1 až 3 se nacházely nad vysílačem a body 4 až 6 se nacházely na druhé straně budovy. Rozmístění měřících bodu je znázorněno na obrázku 5.3. Změřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.3 a jejich závislost je zobrazena na obrázku 5.4.

Tabulka 5.3: Změřené hodnoty měření uvnitř budovy

Pozice měření	1	2	3	4	5	6
$U_{SIG}$ (mV)	851	842	834	836	705	671



Změřené napětí  $U_{\text{SIG}}$  v závislosti na pozici vysílače uvnitř obytného domu



Obrázek 5.4: Graf závislosti napětí  $U_{\text{SIG}}$  na pozici vysílače uvnitř budovy.

Úspěšně byla přijata data ze všech měřených míst domu. V bodech měření 5 a 6 signál procházel složitějším prostředím, oproti měření v bodech 1 až 4, a změřené napětí je zde menší o více než 140 mV, vzhledem k bodu měření jedna. Detekované napětí přijatého signál v bodě 6 odpovídá přibližné hodnotě výkonu -94 dBm. Z výsledku je patrné, že může být použita pouze jedna jednotka pro bezdrátový sběr dat v rodinném domě.



# Závěr

V rámci této bakalářské práce byly realizovány tři autonomní sběrné jednotky, které bezdrátově přijímají data od sensorového uzlu, data ukládají a prostřednictvím jejich přeposílání mezi jednotkami navyšují dosah přenosu dat od sensorového uzlu. Realizované jednotky jsou vyobrazeny v příloze A.1.

Bezdrátová komunikace jednotek probíhá v pásmu 433 MHz. Citlivost jednotky ve funkci přijímače je -112 dBm. Pomocí A/D převodníku mikrokontroléru a radio-komunikačního modulu je měřena síla přijatého signálu. Pro ukládání sensorových dat byla použita micro SD karta. Jednotky se časově synchronizují, aby mohla být podle času přijetí rozpoznána již přijatá sensorová data od nepřijatých. Každá jednotka má přidělen časový interval, ve kterém může vysílat, aby se předešlo vzájemnému rušení. Celkem je možné využít osm vysílacích časových intervalů během dvou sekund. Na bezdrátově přenášená data byl aplikován Hammingův samoopravný kód (7,4), díky kterému lze na přijímací straně detekovat a opravit jednu bitovou chybu, která se vztahuje na čtyři informační bity.

S jednotkou bylo realizováno měření rádiového spojení. Měření na přímou viditelnost vysílače a přijímače ukázalo, že je možné používat zařízení do vzdálenosti 89 metrů. Bylo ověřeno, že se vzdáleností od svého zdroje intenzita vyslaného signálu má klesající exponenciální charakter. Pokud se nacházela mezi vysílačem a přijímačem budova, byla maximální vzdálenost rádiového spojení snížena na 51,5 m. Budovou byla narušena Fresnelova zóna a tím snížena přenesená energie signálu. Měření uvnitř rodinného domu ukázalo, že i když došlo k poklesu intenzity signálu vlivem prostupu skrz zdi, tak pro bezdrátový sběr dat uvnitř rodinného domu stačí použít jednu jednotku.

Během optimalizace firmwaru byl největší problém se synchronizací jednotek, kdy někdy nestačilo jedenkrát bezdrátově vysílat každou synchronizační zprávu, a proto se odesílání zpráv opakuje. Možným řešením problému by byla synchronizace jednotky pomocí počítače a použití obvodu reálného času. Použitím rozhraní USART, nebo jiného drátového rozhraní, pro spojení s počítačem by zmizely problémy, které mohou vzniknout při rádiovém přenosu. Jednotka by pak mohla být synchronizována podle hodin počítače, čímž by byl v jednotce navíc nastaven přesný reálný čas. Při použití obvodu reálného času by mohla být jednotka vypnuta, nebo nastavena do úsporného režimu, a nedošlo by ke ztrátě časového údaje. Jednotka by mohla být ještě vylepšena připojením klávesnice, kterou by byla ovládána. Uživatel by mohl v budoucnu jednoduše klávesnicí nastavit požadovaný režim práce jednotky.



# Literatura

- [1] BOUŘA, Adam. A simple and affordable powering circuit for iot sensor nodes with energy harvesting. *Metrology and Measurement Systems* [online]. 2020, 27(4), 575-587 [cit. 2022-05-13]. ISSN 0860-8229. Dostupné z: doi:10.24425/mms.2020.134839
- [2] GARLÍK, Bohumír. *Elektrotechnika a inteligentní budovy*. [online]. Praha, 2014 [cit. 2022-3-25]. <http://tzb2.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/oppa/skripta-etb-garlik.pdf>
- [3] KOCUR, Z a M ŠAFRÁNEK. Bezdrátové systémy v přístupové síti. *Access server* [online]. 3. 2. 2008 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008020002>
- [4] Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/12.2019-9: k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu. *Zákon o elektronických komunikacích* [online]. Praha, 17. prosince 2019. [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/12.2019-9/obrazky/vo-r10-122019-9.pdf>
- [5] HAC, Anna. *Wireless sensor network designs*. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. ISBN 0-470-86736-1.
- [6] Understanding Bluetooth Range. *Bluetooth* [online]. Bluetooth SIG, Inc, 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/key-attributes/range/>
- [7] 802.15.4 & ZigBee. In: *Web Server Noel* [online]. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: [http://noel.feld.cvut.cz/vyu/scs/prezentace2007/MC1321x\\_ZigBee/802.15.4.htm](http://noel.feld.cvut.cz/vyu/scs/prezentace2007/MC1321x_ZigBee/802.15.4.htm)
- [8] SALAZAR, Jordi. *Bezdrátové sítě* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická, 2017 [cit. 2022-05-13]. ISBN 978-80-01-06196-1. Dostupné z: <http://techpedia.fel.cvut.cz/download/?fileId=779&objectId=50>

- [9] KADIR, Evizal Abdul, A. EFENDI a S. L. ROSA. Application of LoRa WAN Sensor and IoT for Environmental Monitoring in Riau Province Indonesia. In: *2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 281-285 [cit. 2022-05-14]. ISBN 978-1-5386-8402-3. Dostupné z: doi:10.1109/EECSI.2018.8752830
- [10] LoRa Alliance, *LoRaWAN: What is it? , A technical overview of LoRa and LoRaWAN* [online]. 2015. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://loralliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>
- [11] Semtech, *LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview* [online]. 2019.[cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://loralliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>
- [12] DUDÁČEK, K. *Sériová rozhraní SPI, Microwire, I2C a CAN* [online]. 2002 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: [http://home.zcu.cz/~dudacek/NMS/Seriova\\_rozhrani.pdf](http://home.zcu.cz/~dudacek/NMS/Seriova_rozhrani.pdf)
- [13] BARRETT, Steven F. a Daniel J. PACK. *Microcontrollers fundamentals for engineers and scientists*. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2006. ISBN 1-59829-058-4.
- [14] DUDÁČEK, K. *Organizace pam Organizace paměti MCU* [online]. 2002 [cit. 2022-3-25]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dudacek/NMS/PDF/NMS>
- [15] Matoušek, D. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR ATmega 16*, 4. díl, Praha 2006, Nakladatelství BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-174-8.
- [16] DUDÁČEK, K. *Mikrokontroléry* [online]. 2002 [cit. 2022-3-25]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dudacek/Pot/mikrokontrolery.pdf>
- [17] STMicroelectronic, [online katalogový list]. *M95M04-DR*. 2021. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/m95m04-dr.pdf>
- [18] COUGHLIN, Thomas M. *Digital Storage in Consumer Electronics: The Essential Guide* [online]. 2nd edition. Springer International Publishing, 2017 [cit. 2022-05-13]. ISBN 9783319699073. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=5191320>
- [19] Apacer Technology Inc., [online katalogový list]. *CompactFlash Series 6. Industrial CompactFlash Card Product Specifications* 2013. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: [https://www.elvac.eu/ipc/download/APACER/datasheet/CF6\\_SLC\\_AP-CFxxxxRAXS-XXXXXX\\_SPEC\\_Rev1%200.pdf](https://www.elvac.eu/ipc/download/APACER/datasheet/CF6_SLC_AP-CFxxxxRAXS-XXXXXX_SPEC_Rev1%200.pdf)
- [20] OLŠÁK, Petr. *Samoopravné kódy* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <http://petr.olsak.net/bilin/kody.pdf>

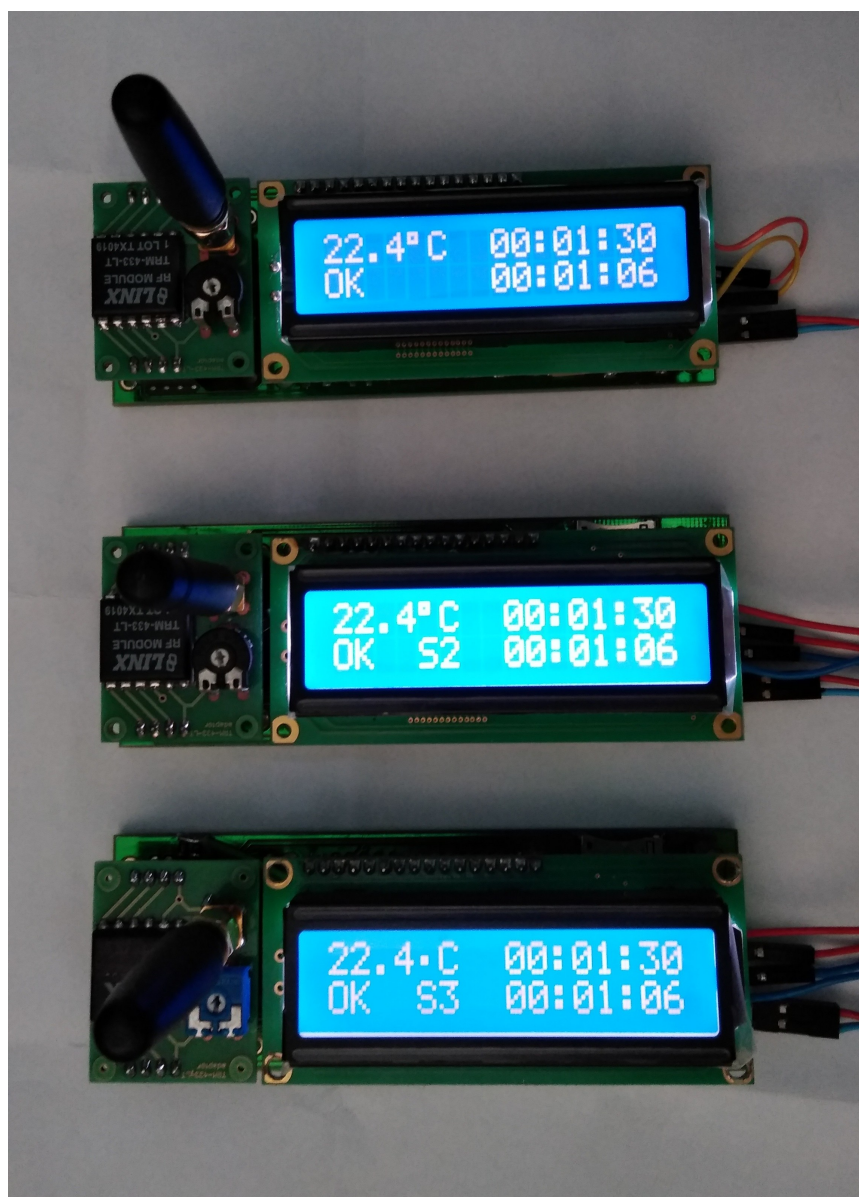
- [21] KANG, Myeongjin a Daejin PARK. Lightweight Microcontroller with Parallelized ECC-Based Code Memory Protection Unit for Robust Instruction Execution in Smart Sensors. *Sensors* [online]. 2021, 21(16) [cit. 2022-05-13]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21165508
- [22] Linx Technologies, [online katalogový list]. *TRM-433-LT*. 2015. [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://linxtechnologies.com/wp/wp-content/uploads/trm-433-lt.pdf>
- [23] Microchip Technology Inc, [online katalogový list]. *ATmegaAT328P*. 2020. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf>
- [24] Mann, B.: *C pro mikrokontroléry*, 1. Vydání, Praha 2003, Nakladatelství BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-077-6.
- [25] Microchip Technology Inc, [online katalogový list]. *MCP7940N* 2020. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005010H.pdf>
- [26] ON Semiconductor, [online katalogový list]. *MC78L05* 2020. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mc78l00a-d.pdf>
- [27] STMicroelectronics, [online katalogový list]. *LF33CDT* 2020. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/SGST/SGST-S-A0003208530/SGST-S-A0003208530-1.pdf?hkey=6D3A4C79FDBF58556ACFDE234799DDF0>
- [28] Plošné spoje. In: *Moodle.fel.cvut.cz* [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/30902/mod\\_resource/content/1/KEO2011-2.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/30902/mod_resource/content/1/KEO2011-2.pdf)



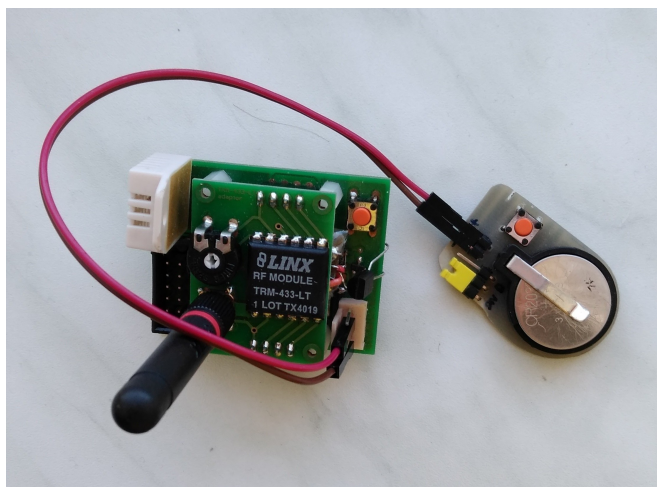


# A. Příloha

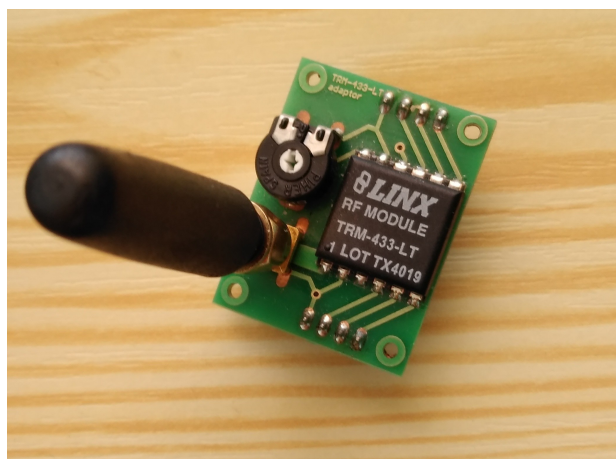
## A.1 Realizované jednotky



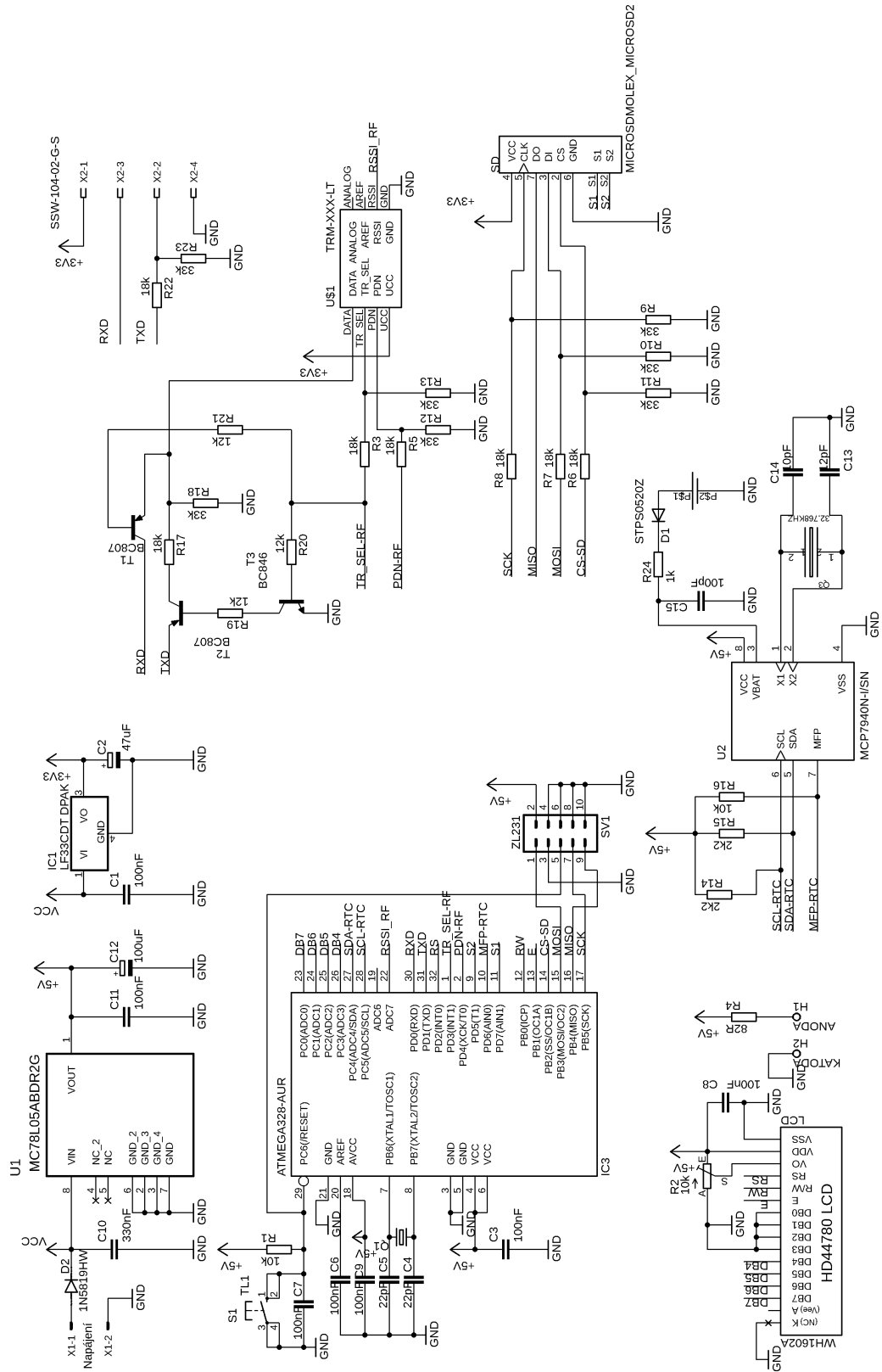
## A.2 Senzorový uzel



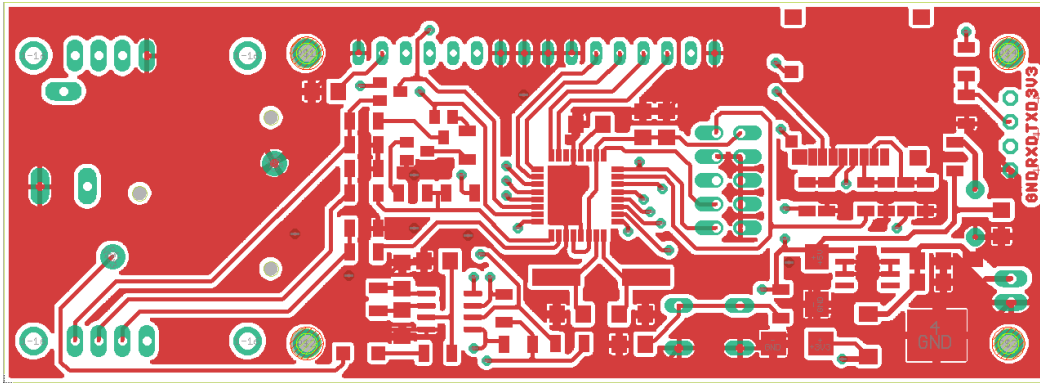
## A.3 Radiokomunikační modul



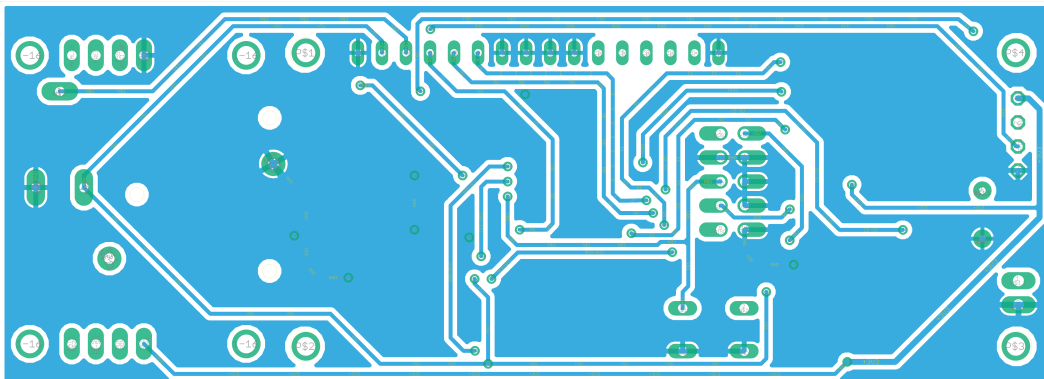
# A.4 Schéma zapojení jednotky



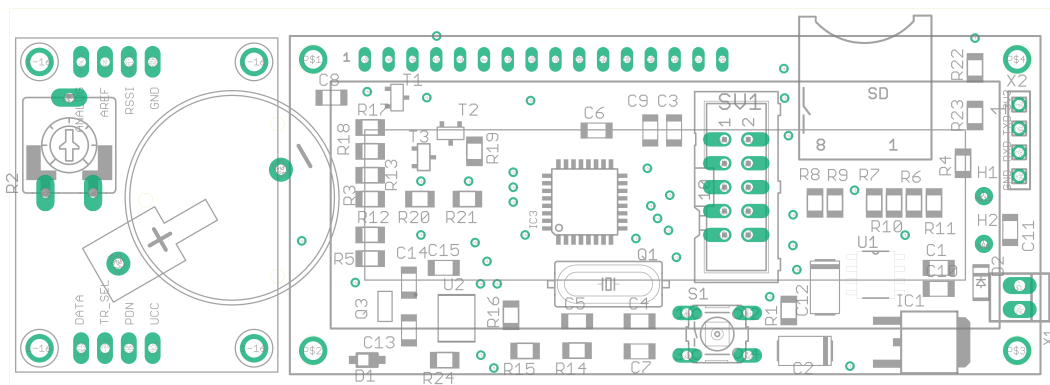
## A.5 Deska plošných spojů-horní strana



## A.6 Deska plošných spojů-dolní strana



## A.7 Deska plošných spojů-rozmístění součástek



## A.8 Měřené prostředí s překážkou





## B. Příloha CD

### B.1 Obsah přiloženého CD

- Text bakalářské práce
- Schéma zapojení a návrh desky DPS v programu EAGLE 9.5.2
- Schéma zapojení a návrh desky DPS v programu EAGLE 6.5.0
- Firmware jednotky
- Firmware sensorového uzlu
- Datový soubor uložený na paměťové kartě jednotky